

Die Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre

von

H. Geitel.

Handbuch der Radiologie

Band I.

Die Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre.

Einleitung. Die radioaktiven Vorgänge innerhalb der Atmosphäre und des Erdkörpers sind seit dem Jahre 1900 der Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen; den Ausgang dieser Arbeiten bildete der Nachweis einer gewissen ständigen Ionisierung der Luft. Als Ursache dieses Zustandes ergab sich unerwarteterweise eine allgemeine Verbreitung radioaktiver Stoffe, besonders des Radiums und seiner Zerfallprodukte im Erdboden und in der Atmosphäre.

Die Bedeutung der Energieform, die in den radioaktiven Vorgängen in den Bereich unserer Untersuchung gelangt, für die Naturgeschichte der Erde ist im Laufe jener Untersuchungen immer deutlicher hervorgetreten, so daß der Versuch einer zusammenhängenden Darstellung der wesentlichsten Ergebnisse dieses neuesten Zweiges der Geophysik vielleicht schon gewagt werden darf.

Hierbei wird die zeitliche Folge der einzelnen Entdeckungen nicht eingehalten werden können; gewisse Grundtatsachen sind voranzustellen, an die sich die Folgeerscheinungen nach ihrem erfahrungsmäßigen Zusammenhange anschließen.

Wir beginnen daher mit der Radioaktivität des Materials, aus dem unser Planet seiner Hauptmasse nach besteht, soweit er uns zugänglich

Anmerkung des Herausgebers.

Der Inhalt dieses, von Professor Geitel bearbeiteten Abschnittes, über die Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre, deckt sich zu einem Teil mit dem inzwischen erschienenen, von Professor Rutherford bearbeiteten Kapitel 19 des II. Bandes dieses Handbuchs. Als die Einteilung des Stoffes in die Einzelbände vorgenommen wurde, war mir noch nicht bekannt, daß auch Rutherford ein Kapitel dieses Inhaltes in sein Werk über Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen aufnehmen würde, und als der Band erschien, war der Geitel'sche Abschnitt im Manuskript bereits fertig, und wurde erst nachträglich wegen der Verzögerung der Drucklegung, die durch die Mitarbeit vieler Forscher bedingt ist, auf den Stand der Forschung im Anfange des Jahres 1914 von Herrn Geitel ergänzt.

Ich denke, der Leser wird die doppelte Darstellung des Gebietes nicht als Nachteil empfinden. Wiederholungen sind bei einem Werke wie diesem, bei dem jeder einzelne Band auch als selbständige Monographie gedacht ist, an sich nicht völlig zu vermeiden; sie werden um so weniger nachteilig empfunden werden, wenn es sich wie hier um Darstellungen handelt, die bei aller Kürze doch neben dem Gemeinsamen auch wesentliche Verschiedenheiten aufweisen.

ist, mit der der Felsarten und der Gesteine. Diese hat zur Folge die gleiche Eigenschaft bei den aus ihnen entstandenen lockeren Erdschichten, die die äußerste Oberfläche der Länder wie der Meeresböden bedecken, sie bedingt ebenso das Vorkommen radioaktiver Emanationen sowohl in der Erde selbst, wie in den in und auf ihr enthaltenen Gasen und Flüssigkeiten, insbesondere der Atmosphäre und den Ozeanen. Der Erdkörper wie die Atmosphäre sind demnach der Sitz radioaktiver Prozesse, von Strahlungen und materiellen Umwandlungen, deren vornehmlichste Wirkung in ersterem die Wärmeerzeugung, in letzterer die Ionisierung ist.¹⁾

1. Die radioaktiven Mineralien und das Verhältnis des darin enthaltenen Radiums zum Uran. Nach einer fest begründeten Ansicht leiten sich sämtliche radioaktiven Elemente — wenn wir zunächst von dem schwach aktiven Kalium und Rubidium absehen — von dem Uran oder dem Thorium ab. Wenn auch im Falle des Aktiniums die verwandtschaftliche Stellung in der Uranfamilie noch nicht völlig geklärt ist, so kann über die Zugehörigkeit zu dieser selbst oder zu einer Seitenlinie kein Zweifel bestehen.

Die eigentlichen Uran- und Thorerze, d. h. diejenigen Mineralien, von denen die chemische Darstellung der radioaktiven Präparate ausgeht, besonders die *Pechblende* (bleihaltiges Uranoxyduloxyd), der *Karnotit* (Uranphosphat und -vanadat), der *Autunit* (Urankalziumphosphat) für das Uran; der *Thorit* und *Orangit* (wasserhaltiges Thorsilikat), der *Monazit* (ein Cerphosphat mit Thorgehalt) für das Thorium, sind, soweit die technisch ausbeutbaren Lagerstätten in Betracht kommen, in geophysikalischer Beziehung nur von lokaler Bedeutung; diese räumlich eng beschränkten Vorkommen, die nur bei den Monazitsanden eine größere Ausdehnung annehmen, beeinflussen den radioaktiven Zustand des Erdkörpers und der Atmosphäre in ähnlich geringem Maße, wie der magnetische durch örtliche Anhäufung von Eisenerzen geändert wird.²⁾

Es ist eine ganz andere Beziehung, in der diese radioaktiven Mineralien hier für uns Bedeutung gewinnen; sie geben uns die einzige Gelegenheit, die Mengenverhältnisse der einzelnen Glieder der radioaktiven Familien zueinander, besonders das für uns wichtigste des Radiums zum Uran an solchen Gemeinschaften von Radioelementen zu bestimmen, deren

1) Während des Drucks dieses Bandes erschien eine wegen ihres reichhaltigen Inhalts sehr empfehlenswerte Monographie von A. Gockel: Die Radioaktivität von Boden und Quellen. Sammlung Vieweg, Braunschweig 1914.

2) Vgl. über radioaktive Mineralien die ausführlichen Darstellungen in den Lehrbüchern von Frau Curie und E. Rutherford (Band II dieses Handbuches). Übersichtliche Zusammenstellungen geben G. v. d. Borne, Jahrb. der Radioaktivität 2, p. 12, 1905, und B. Szilard, Le Radium 6, p. 233. 1909.

Alter nach vielen Jahrmillionen zählt. Auf Grund der Theorie der radioaktiven Umwandlungen von Rutherford und Soddy ist zu erwarten, daß das Uran und Thorium in ihren natürlichen Vorkommen von allen ihren Umwandlungsprodukten begleitet werden. Nimmt man für den Anfangszustand das alleinige Vorhandensein von Uran oder Thor an, so muß das Mengenverhältnis der entstehenden, im Vergleich zu dem Uran und Thor nur kurzlebigen Abkömmlinge unter sich und zu den Muttersubstanzen sich mit wachsender Zeit einer Art von Grenzwerte, in Wirklichkeit einem sehr flachen Maximum nähern, auf dem es lange nahe stationär verharret, nämlich so lange, als die Menge der Muttersubstanz, aus der sich die Kette der Umwandlungsprodukte ergänzt, nicht merklich verringert ist. Man sagt, daß in diesem Falle radioaktives Gleichgewicht besteht. Bezeichnet man mit $x_1, x_2 \dots x_n$ die Zahl der vorhandenen Atome einer Reihe von Substanzen, deren folgende immer aus der vorhergehenden durch radioaktive Umwandlung je eines Atoms in ein anderes entsteht, mit $K_1, K_2 \dots K_n$ die Halbierungskonstanten derselben Stoffe, so ist ¹⁾, wenn radioaktives Gleichgewicht besteht:

$$\frac{x_n}{x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n} = \frac{K_n}{K_1}.$$

Das Verhältnis $\frac{K_n}{K_1}$ kann auch durch das umgekehrte der Umwandlungskonstanten $\frac{\lambda_1}{\lambda_n}$ ersetzt werden.

Versteht man unter der ersten Substanz das Uran, unter der n -ten das Radium, und beachtet, daß eben wegen der außerordentlich großen Halbierungskonstante des Urans die jederzeit vorhandene Atomzahl dieses Elementes bei weitem überwiegt, d. h., daß x_1 sehr groß gegen die Summe

$x_2 + x_3 \dots + x_n$ ist, so hat man mit größter Annäherung $\frac{x_n}{x_1} = \frac{K_n}{K_1}$,

d. h. die in einem genügend alten Uranerze vorhandenen Radium- und Uranmengen müssen im Verhältnis der Halbierungskonstanten dieser Elemente stehen. Diese Verhältniszahl, die demnach auch ein Mittel zur Berechnung der Halbierungskonstante des Urans aus der des Radiums liefert, ist für die verschiedensten Uranmineralien bestimmt worden.

Nach Boltwood ²⁾, der die Frage zuerst behandelte, soll sie für alle natürlichen Radiumvorkommen, wenn man ganz junge Bildungen ausschließt, wie z. B. das von D a n n e ³⁾ beschriebene radiumhaltige

1) H. Mitchell, Phil. Mag. 21, p. 40, 1911.

2) B. B. Boltwood, Phil. Mag. 9, p. 599, 1905.

3) J. D a n n e, Comptes Rendus 140, p. 241, 1905.

Bleiphosphat aus der Nachbarschaft der Lager des Autunits bei Autun, konstant gleich $3,8 \cdot 10^{-7}$ sein.

Unter Beschränkung auf Pechblendes verschiedensten Ursprungs fanden Heimann und Markwald¹⁾ in sehr guter Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen von Rutherford und Boltwood das Verhältnis ebenfalls als innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler konstant (bis auf 0,4 Proz.), der Zahlenwert betrug $3,33 \cdot 10^{-7}$.

Aus Untersuchungen von Ellen Gleditsch²⁾ würde dagegen folgen, daß in Uranmineralien beliebiger Art das Verhältnis zwischen $1,82 \cdot 10^{-7}$ und $3,72 \cdot 10^{-7}$ schwanken kann, je nach der Natur des in Betracht gezogenen Minerals.

Es liegt, nahe, die kleineren Zahlen darauf zurückzuführen, daß der Gleichgewichtszustand zwischen Uran und Radium noch nicht in allen diesen Erzen in gleichem Maße annähernd erreicht zu sein braucht. Eine solche Verzögerung, selbst während geologischer Zeiträume, erscheint deshalb durchaus möglich, da zwischen Uran und Radium sich ein sehr langlebiges Zwischenprodukt, das Ionium, einschleibt, dessen Halbwertszeit konstante etwa von der Größenordnung einer Million Jahre sein dürfte³⁾.

2. Die radioaktiven Einschlüsse in primären Gesteinen und die durch Radioaktivität bewirkten Veränderungen an Mineralien. Die radioaktiven Mineralien, von denen im vorigen die Rede war, sind teils als Einschlüsse in primären Gesteinen, wie Granit und Pegmatit enthalten, teils sekundär, wahrscheinlich als Ausscheidungen heißer Dämpfe und Sickerwässer in Spalten derselben Felsarten oder auch metamorphischer Gesteine abgelagert, dabei hat eine natürliche Konzentration der aktiven Elemente stattgefunden, die stellenweise bis zur Abscheidung fast reiner Uranverbindungen geführt hat.

Die letztere Art des Vorkommens ist, wie schon bemerkt, von keiner Bedeutung für die Gesamtheit des Erdkörpers, dagegen hat sich herausgestellt, daß alle Urgesteine, und daher auch die aus ihnen entstandenen metamorphischen Bildungen, Radium und Thorium, zwar in geringer und wechselnder Menge, aber im ganzen in gleichförmiger Verteilung enthalten, hieraus ergibt sich für unsern Planeten insgesamt ein Gehalt an Radioelementen, dessen Energieentwicklung nicht vernachlässigt werden darf.

An welche speziellen Bestandteile diese radioaktiven Elemente gebunden sind, ist mit völliger Sicherheit noch nicht zu sagen, gewiß ist, daß Uran und Thormineralien in Gestalt mikroskopisch kleiner Ein-

1) Berta Heimann und W. Markwald, Jahrbuch der Radioaktivität u. Elektronik 10, S. 299, 1913, u. Phys. Zeitschr. 14, p. 303, 1913.

2) Ellen Gleditsch, Le Radium 8, p. 266, 1911.

3) H. Geiger und J. M. Nuttall, Phil. Mag. 22, p. 619, 1911.

schlüsse in allen Urgesteinen vorkommen, und man kann es als wahrscheinlich betrachten, daß aus diesen winzigen Beimengungen allein ihr Radium- und Thoriumgehalt her stammt. So hat J. W. Waters¹⁾ im gewöhnlichen Granit von Cornwall kleinste Krystalle von Allanit (Orthit) und Zirkon nachgewiesen, beide Mineralien sind durch einen geringen Gehalt an Thor und Uran radioaktiv. Mache und Bamberger²⁾ erhielten durch Zentrifugieren zerkleinerten Gneißgranites aus dem Tauern-tunnel mit Bromoform und Methylenjodid eine Konzentration der Radioaktivität auf die schwersten Gesteinsfragmente von mehr als dem Hundertfachen der des Ausgangsmaterials. Die Fragmente bestanden im wesentlichen aus Orthit und Titanmineralien.

Man würde bei so geringen Substanzmengen bis jetzt kein Mittel haben, die Radioaktivität jedes dieser eingesprengten einzelnen Partikelchen auf die bekannten Radioelemente zurückzuführen, wenn die Natur nicht vorgearbeitet hätte. Wie Joly³⁾ erkannt hat, verraten sich mikroskopisch kleine Einschlüsse radioaktiver Natur (Zirkon, Apatit, Sphen, Anatas, Rutil) in der umgebenden Substanz, wenn diese aus Glimmer, Hornblende, Diopsid und ähnlichen Mineralien besteht, durch pleochroistische kreisförmige (in Wirklichkeit kugelförmige) Zonen und Höfe von einem Maximalradius bis 0,04 mm, die unter dem Einfluß der α -Strahlen im Laufe ungemein langer Zeiträume gebildet sind, ähnlich, wie man sie künstlich in Glas durch Einwirkung von Radium C herstellen kann⁴⁾. Aus den gemessenen Radien der Höfe im Zusammenhange mit der bekannten Dichtigkeit des Minerals läßt sich die Reichweite von α -Strahlen in Luft berechnen, die jene Höfe erzeugt haben können, wobei zustatten kommt, daß die Färbung am Rande der Höfe sich am deutlichsten ausgeprägt hat.

Joly findet so entsprechend den Radien der aufeinanderfolgenden Zonen dieser Höfe, die übrigens nicht in allen Exemplaren mit übereinstimmender Schärfe ausgebildet sind, eine Reihe von getrennten Reichweiten. Diese können, von innen beginnend, denen der α -Strahlen des Ur_1 und Ur_2 , des Ioniums, Radiums, des RaF , der Radiumemanation, des RaA und RaC zugeordnet werden. Die äußerste Zone von 0,04 mm Radius entspricht der Strahlung des Thorium C. Es ist verständlich, daß sehr nahe übereinstimmende Reichweiten, wie z. B. die dem Ur_2 und dem Ionium zugehörigen bei der Kleinheit des Objektes ineinanderfließen.

1) J. W. Waters, Phil. Mag. 19, p. 903, 1910.

2) H. Mache und H. Bamberger, Wien. akadem. Anzeiger, 22. Jan. 1914 u. Wien. Ber. 123, p. 327, 1914.

3) J. Joly, Phil. Mag. 13, p. 381, 1907; ibid. 19, p. 327, 1910; J. Joly und A. L. Fletcher, Phil. Mag. 19, p. 630, 1910; J. Joly, Comptes Rendus du Congrès International de Radiologie. Bruxelles 1910. p. 386.

4) E. Rutherford, Phil. Mag. 19, p. 494, 1910.

Wir haben hier eine Dauerwirkung, eine Art von Selbstaufzeichnung vor uns, die erst dadurch merklich geworden ist, daß sie sich über sehr große Zeiträume erstreckte. Bei ihr hat nur die auf beschränktem Raume wirkungsvollste Strahlengattung, die der α -Strahlen, ihre Spur hinterlassen.

Die Dunkelfärbung von Glimmer läßt sich wie beim Glase leicht durch Einwirkung von α -Strahlen künstlich hervorrufen. Eine intensive und zugleich quantitativ zu bemessende Strahlung erhält man mittelst einer bekannten Menge von Radiumemanation, die in einer Glaskapillare von sehr kleiner Wandstärke (äquivalent etwa 1,4 cm Luft unter normalen Bedingungen) eingeschlossen ist. Man kann aus ihrer Gesamtstrahlung ein Bündel ausblenden, das einen angebbaren Bruchteil davon ausmacht. Setzt man die Einwirkung dieses Strahlenbündels auf eine Glimmerplatte solange fort, bis für gleiche Schichtdicke derselbe Färbungsgrund wie bei den natürlichen Höfen erreicht ist, und bestimmt die dazu benötigte Zeit mit möglichst großer Schärfe, so läßt sich unter der Annahme, daß gleiche Färbungen durch gleiche Mengen von α -Teilchen hervorgerufen werden, eine Schätzung des Alters jener natürlichen Höfe gewinnen, sobald die Natur ihres radioaktiven Kernes bekannt ist. In einigen Fällen, nämlich bei Einschlüssen von Zirkon, ist diese Feststellung mit einiger Wahrscheinlichkeit möglich. Aus dem Urangehalte des Zirkons (der nach Analysen großer Krystalle im Maximum 10 % beträgt) und der Größe des eingebetteten Fragments findet man die Zahl der α -Teilchen, die — etwa im Laufe eines Tages — von diesem Kerne ausgestrahlt werden. Andererseits kennt man aber die Anzahl der α -Teilchen, die von der Vergleichsmenge von Radiumemanation einschließlich ihrer Zerfallprodukte in derselben Zeit abgeschleudert werden, und daher auch die Menge der α -Teilchen, die auf der Versuchsplatte von Glimmer dieselbe Färbung hervorgebracht haben, wie sie in den natürlichen Höfen vorliegt. Hiernach berechnet sich leicht, wieviel mal länger der Zirkonkern auf den Glimmer einwirken mußte, um den gleichen Farbenton hervorzurufen. Die Rechnung bedarf einer Korrektur, indem man die allmähliche Abnahme des Urans im Laufe der Zeit in dem aktiven Kerne entsprechend der Halbierungskonstante dieses Elements berücksichtigt.

Da die krystallisierten Kerne der Höfe sich nach den Spaltflächen des Glimmers gelagert erweisen, so wird man annehmen dürfen, daß sie gleichzeitig mit dem Glimmer ihre starre Form angenommen haben. Das nach dieser Methode [die man Joly und Rutherford¹⁾ verdankt] bestimmte Alter des Minerals ist von der Zeit an zu rechnen, als die Temperatur des Glimmers niedrig genug war, um unter der Wirkung der α -Strahlen

1) J. Joly und E. Rutherford, Phil. Mag. 25, p. 644, 1913.

sich in gleicher Weise wie die Versuchsplatte zu färben. Die so ermittelten Beträge für das Alter der Höfe und somit auch der sie enthaltenden Gesteine liegen zwischen 20 bis 400 Millionen Jahren (vgl. Abschn. 30).

Im Zusammenhange mit dieser Wirkung der α -Strahlen stehend, aber durch die Art ihres Nachweises völlig verschieden, ist eine andere sehr wahrscheinlich ebenfalls durch die Radioaktivität allmählich entstandene Veränderung mancher Mineralien, die sich an ihrem photoelektrischen Verhalten erkennen läßt.

Die Salze und Silikate der Alkalien und alkalischen Erden erfahren unter dem Einflusse der β - und γ -Strahlen radioaktiver Stoffe, ähnlich wie durch Kathodenstrahlen, eine gewisse Zersetzung, indem sich freies Metall absplattet, das sich in äußerster Verteilung, wahrscheinlich in kolloider Form in der Grundsubstanz verbreitet und in der Regel eine bestimmte Färbung hervorruft. Da Schichtdicken von mehreren Zentimetern Stärke von dieser Veränderung ergriffen werden, so müssen eben die stärker durchdringenden β - und γ -Strahlen die Ursache sein.

Viele Mineralfärbungen, z. B. die blaue des Flußspates, lassen sich auf diese Weise künstlich durch Radiumstrahlen hervorrufen. Nun zeigen solche farbigen festen Lösungen der Alkalimetalle und der alkalischen Erden wie die freien Metalle auf frischen Oberflächen den Hallwachs Effekt, die Emission negativer Elektronen im Lichte, die an anderen Stoffen im allgemeinen nur durch Ultraviolett hervorgerufen wird, schon bei Bestrahlung mit sichtbarem Lichte^{1) 2)}. Dieselbe Eigenschaft ist aber auch an den natürlichen blauen Fluoriten, an manchen Proben von violetterm Steinsalz, ja selbst an frisch zerkleinertem Urgestein in merklichem Grade nachweisbar. Sie ist im letzten Falle wahrscheinlich eine Folge der chemischen Veränderung, die die Alkalisilikate unter der Strahlung der radioaktiven Einschlüsse erfahren haben³⁾. Gealterte Oberflächen zeigen den Effekt nicht oder in sehr abgeschwächtem Maße, die Ursache dieser „Ermüdung“ liegt ohne Zweifel in einer chemischen Veränderung der lichtempfindlichen Metallteilchen, sie wird in vielen Fällen durch Einwirkung des Lichtes unter gleichzeitigem Bleichen der Farbe beschleunigt.

Zu einer ähnlichen Auffassung gelangt Strutt⁴⁾ hinsichtlich der Farbe des Hyazinths, der durchsichtigen braunrot gefärbten Varietät des Zirkons, die in Basalten und Laven eingeschlossen vorkommt. Dies Mineral

1) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 4, p. 113, 1902.

2) St. Meyer und K. Przibram, Wien. Ber. 121, p. 1413, 1913.

3) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. 44, p. 722, 1891 und 52, p. 453. 1894; H. Geitel, Comptes Rendus du Congrès Intern. de Radiologie. Brüssel 1910. p. 580.

4) R. J. Strutt, Proc. Royal Soc. A. 89, p. 405, 1913.

wird beim Erhitzen bis 300° C unter Auftreten von Thermolumineszenz farblos, durch Radiumstrahlen kann die ursprüngliche Färbung wieder hergestellt werden. Das Verhalten ist ganz dem des blauen Fluorits analog. Es ist nicht abzusehen, wie diese Färbung des Hyazinths bei der hohen Temperatur der einschließenden Laven entstehen oder erhalten bleiben konnte, wenn man nicht annimmt, daß sie erst nach Abkühlung des Minerals allmählich durch die radioaktiven Substanzen hervorgerufen ist, die das Element Zirkon zu begleiten pflegen.

Die J o l y schen Höfe, wie die photoelektrische Empfindlichkeit der Gesteine brauchen nicht notwendig auf eine noch bestehende Radioaktivität hinzuweisen, sie können auch von fast oder ganz erloschenen Strahlungen herrühren. Sehr wahrscheinlich gilt dies allgemein von der blauen Färbung der Fluorite, an denen keine irgend erhebliche Radioaktivität mehr bemerkbar ist. Vermutlich sind diese bei ihrer Bildung dem Einflusse radioaktiver Emanationen ausgesetzt gewesen, die samt ihren Zerfallprodukten ihre Aktivität längst eingebüßt haben. Interessant ist in diesem Zusammenhange, daß zu den Begleitmineralien des durch seine tiefblaue Farbe und große photoelektrische Empfindlichkeit ausgezeichneten Fluorites von Wölsendorf (Bayern) der Uranglimmer gehört.¹⁾

Sowohl die Selbstaufzeichnung der α - wie auch die der β - und γ -Strahlen in geeigneten Mineralien darf als ein äußerst empfindliches Kennzeichen der Tätigkeit radioaktiver Prozesse betrachtet werden, da ja selbst sehr schwache Wirkungen im Laufe geologischer Zeiträume sich zu merklichen Beträgen anhäufen konnten. Nun ist der Ursprung der J o l y schen Höfe, soweit diese bis jetzt erforscht sind, ausschließlich auf die α -Strahlen der Uran- und Thoriumfamilie zurückführbar, die Wahrscheinlichkeit, daß noch unbekannte Quellen von α -Strahlen in den diese Höfe führenden Mineralien enthalten wären, ist demnach sehr gering.

Dagegen würde es sich immerhin noch verlohnen, photoelektrisch besonders wirksame Mineralien, wie etwa die stark blau gefärbten natürlichen Fluorite, auf etwaige schwach radioaktive Bestandteile hin zu prüfen, oder in ihnen nach den Endgliedern der radioaktiven Umwandlungsreihen zu suchen. Die Frage nach dem Vorkommen wahrer Radioaktivität außerhalb der Reihen des Urans und Thors und neben dem Kalium und Rubidium bietet außer dem allgemeinen auch ein erhebliches geophysikalisches Interesse (vgl. Abschn. 31).

3. Die direkte Bestimmung des Radiums in Erdproben und Gesteinen.

Zum Nachweise der in Gesteinen und Erdarten enthaltenen radioaktiven Substanzen und zu ihrer quantitativen Bestimmung reichen gegenüber

1) B. D a m m e r u. O. T i e t z e, Die nutzbaren Mineralien, Stuttgart 1913, p. 318.

den sehr kleinen Mengen des aktiven Stoffes die gewöhnlichen Methoden der analytischen Chemie in der Regel nicht aus. Beim Radium kennt man allerdings ein ziemlich scharfes Trennungsv erfahren, das auf der Unlöslichkeit seines Sulfates im Wasser beruht und das in den Fällen Erfolg verspricht, in denen das Rohmaterial, wie bei manchen Tonen und Quellsedimenten, in feinzerteilter oder leicht löslicher Form vorliegt, während das Radium, meist mit Barium vergesellschaftet als Sulfat oder Karbonat darin enthalten ist. Durch Kochen mit Kalium- oder Natriumkarbonatlösung werden beide Sulfate in die Karbonate übergeführt. Der ausgewaschene Rückstand gibt beim Behandeln mit reiner Salzsäure das Barium und Radium als leicht lösliche Chloride ab und aus der Lösung können beide dann wieder — nötigenfalls nach Zusatz einer Spur von Chlorbarium, wenn das Ausgangsmaterial bariumfrei war — zusammen als sogenanntes Radiobariumsulfat gefällt werden. Auf diese Weise ist eine Konzentration des Radiumgehaltes auf sehr geringe Stoffmengen möglich. Das erhaltene Radiobariumsulfat kann dann durch Vergleichung seiner γ -Strahlung mit einem Radiumpräparat von bekannter Zusammensetzung¹⁾ oder nach der im folgenden noch zu besprechenden Emanationsmethode nach seinem Radiumgehalte ausgewertet werden²⁾ (vgl. Abschn. 4).

Wenn auch der erste Nachweis des Vorkommens von Radium in Tonen, Erdarten und Quellsiederschlägen und seine Abscheidung aus solchen Stoffen mittelst eines ähnlichen Verfahrens erzielt ist³⁾, so kann man der Methode wegen der technischen Schwierigkeiten, die in der Bewältigung großer Mengen von Ausgangsmaterial liegen, eine gewisse Schwerfälligkeit nicht absprechen. Zumal würde die Dosierung des Radiums in den Urgesteinen, bei denen eine vollständige Aufschließung der Silikate und weitere chemische Behandlung der Lösungen vorzunehmen wäre, sehr umständlich werden.

4. Indirekte Radiumbestimmung mittelst der Emanation. Uran-gehalt der Gesteine. Man verzichtet daher vielfach auf den Versuch, die Radioelemente zu isolieren oder zu konzentrieren, und bestimmt ihre Menge indirekt in dem in geeigneter Weise vorbereiteten Rohmaterial. Es ist dies möglich sowohl für das Radium wie für das Thorium, und

1) Bestimmungen des Radiumgehaltes solcher Vergleichspräparate werden von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Charlottenburg ausgeführt. (Zeitschr. für Instrumentenkunde 33, p. 259, 1913).

2) H. Holthusen, Sitzungsber. der Heidelberger Akademie, Abt. A, 16. Abhandlung, 1912.

3) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 5, p. 16, 1903; F. Giesel, Phys. Zeitschr. 6, p. 205, 1905.

zwar infolge der Eigenschaft beider Elemente, unter der Zahl ihrer Zerfallprodukte eine radioaktive Emanation zu entwickeln, die als gasförmiger Körper mit großer Schärfe von dem übrigen Materiale getrennt werden kann. Ein sehr günstiger Umstand liegt in der großen Verschiedenheit der Halbierungskonstanten der beiden Emanationen (für Radium 3,85 Tage, für Thorium 54 Sekunden) und ihrer Abkömmlinge, die eine Bestimmung beider Radioelemente in demselben Materiale möglich macht. Das Aktinium dagegen, das ebenfalls eine, aber sehr schnell sich umwandelnde Emanation liefert (Halbierungskonstante 3,9^h), und dessen hier wesentlich in Betracht kommendes Zerfallprodukt (Aktinium B) eine von denen des Radiums (B und C) nicht eben sehr verschiedene Halbierungskonstante hat, ist ebendeshalb weit schwieriger neben dem Radium nachzuweisen.

Die Methode, das Radium in beliebigen Gesteinen mittelst seiner Emanation quantitativ zu bestimmen, rührt von R. J. Strutt¹⁾ her. Eine gewogene Menge des Materials (es genügen 50 g) wird in fein gepulvertem Zustande in ein Gemisch von Kalium- und Natriumkarbonat (etwa 250 g) portionsweise eingetragen, das in einer Platinschale über einer Gebläseflamme geschmolzen ist. Wenn die Masse nach Beendigung der Reaktion ruhig fließt, wird sie erkalten gelassen und in heißem Wasser gelöst, auch der etwa verbleibende Rückstand wird für sich besonders durch Zusatz von Salzsäure in Lösung übergeführt. Beide Flüssigkeiten werden in je eine so große Kochflasche gefüllt, daß ein Teil des Volumens frei bleibt, und gut verschlossen drei Wochen stehen gelassen. Während dieser Zeit stellt sich nahezu (bis auf 2 Proz.) das radioaktive Gleichgewicht zwischen dem Radium und seiner Emanation her, die teils in der Flüssigkeit gelöst bleibt, teils sich mit der in den Flaschen enthaltenen Luft vermischt. Nach dieser Zeit wird die angesammelte Emanation durch Auskochen aus den Lösungen befreit und mit der darüberstehenden Luft in einen gläsernen Behälter geleitet, in dem sie durch ausgekochtes Wasser oder besser durch Kochsalzlösung von der Außenluft abgeschlossen ist. Aus diesem kann sie dann nach Passieren einer Trockenröhre direkt in die Ionisierungskammer, etwa ein Wilsonsches Elektroskop, das zur Messung des Emanationsgehaltes dient und zuvor leer gepumpt war, übergeführt werden. Der Innenraum des Elektroskops, das die Ionisierungskammer darstellt, ist so bemessen, daß nach diesen Operationen noch ein Minderdruck darin verbleibt, der durch Zulassen von atmosphärischer Luft, die die letzten Emanationsreste nachspült, ausgeglichen wird.

1) R. J. Strutt, Proc. Royal Soc. A. 77, p. 472, 1906.

Das Elektroskop ist vorher dadurch geeicht, daß in der beschriebenen Weise die Emanation hineingeführt wurde, die mit einer bekannten Menge von Radium im Gleichgewicht stand. Da es sich bei der Empfindlichkeit der elektroskopischen Methode nur um äußerst geringe Konzentrationen dieser Vergleichslösungen von Radium handeln konnte, verschaffte sie sich *Strutt* durch Auflösen einer kleinen Menge eines Uranminerals von bekanntem, chemisch ermittelten Urangehalt. Aus letzterem wurde dann mittelst der *Boltwood* schen Zahl (vgl. Abschn. 1) auch die entsprechende Menge des Radiums berechnet. Hiernach konnte bestimmt werden, wieviel an Radium dazugehörte, durch die mit ihm im Gleichgewicht befindliche Emanation einen Rückgang des Elektroskopblättchens um einen Skalenteil zu bewirken. Es versteht sich von selbst, daß alle bei der chemischen Aufbereitung angewandten Materialien zuvor auf etwaigen Radiumgehalt nach derselben Methode untersucht waren, und daß sowohl bei der Eichung wie bei der Messung die natürliche Ionisierung der Luft im Elektroskop sowie der Einfluß des an den Wänden des letzteren aus der Emanation entstandenen aktiven Niederschlages nach Ausblasen der emanationshaltigen Luft bestimmt und in Abrechnung gebracht wurden. Man kann auch das Eintreten des Gleichgewichtszustandes zwischen der Emanation und dem aktiven Niederschlag abwarten; die durch letzteren bewirkte Ionisierung läßt sich durch Rechnung bestimmen und von dem Gesamtbetrage abziehen. (Abschn. 13).

Strutt hat auf diese Weise eine große Anzahl von Graniten, Syeniten und Basalten untersucht, die von ihm gefundenen Zahlen schwanken zwischen $4,78 \cdot 10^{-12}$ bis $0,30 \cdot 10^{-12}$ Gramm Radium für das Gramm Substanz und zwischen $12,6 \cdot 10^{-12}$ bis $0,92 \cdot 10^{-12}$ Gramm für das Kubikzentimeter. Als annehmbarer Durchschnittswert kann $3 \cdot 10^{-12}$ Gramm *Ra* für das Gramm Gestein gelten. In naher Übereinstimmung hiermit finden *Mache* und *Bamberger*¹⁾ für den Gneißgranit des Tauern-tunnels den Durchschnittsbetrag von $4,0 \cdot 10^{-12}$ Gramm *Ra*. *Joly*²⁾ gibt für den Finsteraarhorngranit den Mittelwert $6,7 \cdot 10^{-12}$ und für den Gotthardgranit $3,5 \cdot 10^{-12}$ Gramm an. Im allgemeinen ist der Radiumgehalt der kieselsäurereichen Urgesteine größer als der der basischen³⁾. Nach *Joly* zeigen gewisse Laven vom Vesuv bis $16 \cdot 10^{-12}$ Gramm Radiumgehalt für die Gewichtseinheit.

Bei dem geologischen Alter der untersuchten Urgesteine ist es sicher, daß der beobachtete Radiumgehalt durch die zugehörige Gleichgewichtsmenge an Uran dauernd erhalten werden muß. Infolge der Unempfind-

1) H. *Mache* und M. *Bamberger* l. c.

2) J. *Joly*, *Phil. Mag.* 23, p. 210. 1912.

3) E. H. *Büchner*, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 10, p. 516, 1913.

lichkeit der chemischen Reaktionen auf Uran ist aber der direkte Nachweis der Gegenwart dieses Metalles nur bei einigen radiumreichen Graniten, nämlich solchen aus dem Simplontunnel¹⁾ und von der Insel Monte Cristo²⁾ gelungen.

Es ist zu erwarten, daß das in den primären Gesteinen enthaltene Uran samt seinem Abkömmlinge, dem Radium, sich auch in den aus ihnen entstandenen sedimentären Schichten wieder finden wird³⁾. Während der Verwitterungs- und Denudationsprozesse, deren Endprodukte durch das Wasser, an entlegenen Orten wieder abgelagert wurden, ist aber im allgemeinen eine Sonderung eingetreten, die zu einer lokalen Verarmung an radioaktivem Material geführt hat, der an anderen Stellen eine Anreicherung gegenübersteht. So ist der Quarzsand und aller Sandstein wie auch der Kalk⁴⁾ verhältnismäßig sehr arm an Radium, dagegen sind besonders reich manche Arten von Ton und tonhaltigem Gestein. Es ist daher anzunehmen, daß die aktiven Verwitterungsprodukte der eigentlich uran- und radiumführenden Einschlüsse der Urgesteine sich im allgemeinen mit denen der Feldspate und überhaupt der Aluminiumsilikate gemeinsam abgesetzt haben. Wahrscheinlich spielten auch Adsorptionserscheinungen dabei eine Rolle, indem die im Wasser spurenweis gelösten Uranverbindungen durch das Aluminiumsilikat, ähnlich wie z. B. Radiothor durch Eisenhydroxyd, ausgefällt wurden⁵⁾. Auch die jetzt noch in Bildung begriffenen Schlammlagerungen der Ozeane zeigen nach Joly⁶⁾ einen auffallend hohen Radiumgehalt, nämlich bis zu $50 \cdot 10^{-12}$ g auf das Gramm Substanz. Eine merkliche Aufspeicherung des Urans und Radiums in organischer Substanz scheint im allgemeinen nicht erfolgt zu sein. So ist der Radiumgehalt der Steinkohle äußerst gering, während der ihrer Asche (bis zu $2 \cdot 10^{-12}$ g für das Gramm)⁷⁾ dem Durchschnittsbetrage für die Sedimentärgesteine ($1,5 \cdot 10^{-12}$ g) nahe kommt. Auffallend viel Uran (etwa 20% U_3O_8) enthält dagegen die Asche des sog. Kolm, einer Kohlenart aus kambrischen Alaunschiefern vom Wettersee in Schweden.⁸⁾

1) J. Joly, Reports of the British Assoc. Dublin Meeting. p. 680, 1908. (Nach Bestimmungen von E. Werner.)

2) R. Nasini und F. Ageno, Rend. Acc. dei Lincei 21, p. 691, 1912.

3) J. R. Strutt, Proc. Roy. Soc. 78, p. 150, 1906.

4) A. L. Fletcher, Phil. Mag. 23, p. 291, 1912.

5) E. Ebler und M. Fellner, Zeitschr. f. anorganische Chemie 72, p. 233, 1911 und 73, p. 1, 1911; T. Godlewski, Ber. der Krakauer, Ak. Ser. A., Januar 1914, ferner Kolloidzeitschrift 14, p. 239, 1914.

6) J. Joly, Phil. Mag. 16, p. 190, 1908.

7) St. J. Lloyd and J. Cunningham, Chem. Centralblatt 2, p. 990, 1913; Ch. Moureu et A. Lepape, Comptes Rendus 158, p. 601, 1904.

8) B. Dammer und O. Tietze, Die nutzbaren Mineralien, Stuttgart 1913, p. 489.

Bei der *Strutt'schen* Methode der Aufschließung der pulverisierten Silikate durch Schmelzen mit kohlen saurem Alkali ist die vollständige Überführung des Materials in eine klare Lösung schwer zu erreichen. Da erfahrungsmäßig sowohl das Radium wie die Radiumemanation von feinzerteilten Niederschlägen festgehalten wird, so müßte man eine zu niedrige Bestimmung des Radiumgehaltes der Gesteine befürchten. *Joly*¹⁾ und *Ebler*²⁾ haben deshalb die beim Schmelzen des pulverisierten Gesteins mit Alkalikarbonat entweichende Emanationsmenge direkt aufgefangen und zur Radiumbestimmung verwandt. In vielen Fällen liegen die so erhaltenen Beträge tatsächlich oberhalb der durch *Strutt's* Verfahren gefundenen, doch bleibt die Größenordnung im wesentlichen dieselbe. *H. Holthusen*³⁾ empfiehlt, das vorher aus den Silikaten gewonnene Radiobariumsulfat unter Zusatz von Natrium- und Lithiumkarbonat in einem Glasgefäß über der Bunsenflamme zu schmelzen, und die entwickelte Emanationsmenge in ähnlicher Weise, wie oben beschrieben, elektrometrisch zu bestimmen. *Mache* und *Bamberger* äußern Bedenken gegen die Gewinnung der Emanation durch Auskochen der wässerigen Lösungen, da auch bei Siedetemperatur noch beträchtliche Emanationsmengen zurückgehalten würden; sie empfehlen das Ausschütteln der Lösungen mit Luft, wie es bei Emanationsbestimmungen von Wässern angewandt wird (Abschn. 13).

5. Direkte Bestimmung des Thorgehalts von Gesteinen. Wir haben uns im vorigen auf das Uran und seinen wichtigsten und am leichtesten zu dosierenden Abkömmling, das Radium, beschränkt. Aber auch das Thorium verdient eine eingehende Würdigung, wie schon daraus hervorgeht, daß die radioaktiven Mineralien, die als uran- und radiumführende bekannt sind, meist auch Thorium enthalten. Von den Thormineralien ist der *Monazit* in weit beträchtlicheren Massen auf der Erde verbreitet, wie die eigentlichen Uranerze. Die quantitative Trennung geringer Spuren von Thorium aus einer großen Masse verschiedener Silikate, wie in den Urgesteinen, gelingt, wie oben schon angedeutet, noch schwieriger wie die entsprechende Operation beim Radium. Ein Versuch dieser Art ist von *G. A. Blanc*⁴⁾ gemacht, durch den der Thorgehalt von Granit, Syenit und der Ackererde von Rom direkt nachgewiesen wurde. Die in den Gesteinsproben enthaltenen seltenen Erden wurden gemeinsam gesammelt, nach-

1) *J. Joly*, *Phil. Mag.* 22, S. 134, 1911 u. ebenda 24, p. 694, 1912.

2) *J. Ebler*, *Phys. Zeitschr.* 13, p. 986, 1912.

3) *H. Holthusen*, l. c.

4) *G. A. Blanc*, *Rend. Real. Acc. d. Lincei.* 18, p. 241, 1909; *Phil. Mag.* 18, p. 146, 1909.

dem das Radium als Sulfat aus den Lösungen entfernt war. Durch Vergleichung der Aktivität der erhaltenen Proben mit der einer gewogenen Menge Thoriumhydroxyds ließ sich — unter einem noch zu erörternden Vorbehalte — (Abschn. 6) ihr Gehalt an Thorium bestimmen, er lag bei den Urgesteinen zwischen $8,28 \cdot 10^{-5}$ bis $2,07 \cdot 10^{-5}$ g für das Gramm Substanz.

6. Indirekte Thorbestimmung vermittelt der Emanation. Eine einfachere und wohl auch genauere Methode ist in Anlehnung an das Strutt'sche Verfahren zur Radiumbestimmung von Joly¹⁾ gearbeitet, sie gründet sich auf die erwähnte starke Verschiedenheit in den Abfallkonstanten der Radium- und Thoriumemanation. Während eine von Emanation befreite Radiumlösung einige Wochen braucht, um sich durch Neubildung von Emanation wieder in radioaktives Gleichgewicht zu setzen, erfordert das Thorium, sofern in seiner Lösung noch das Zwischenprodukt Thorium X verblieben ist, hierzu nur einige Minuten. (Etwa 5 Minuten zur Annäherung auf 2 Proz. der Gleichgewichtsmenge.) Liegt daher der Radiumgehalt einer Substanz in den niedrigen Grenzen, wie sie von Strutt für die Gesteine nachgewiesen sind, und hat man aus der zu untersuchenden Lösung die Radiumemanation durch Kochen ausgetrieben, so darf man ihre Neubildung innerhalb der ersten Stunde vernachlässigen, da in dieser Zeit noch nicht ein Prozent der Gleichgewichtsmenge gebildet werden würde. Saugt man nun Luft durch die Lösung in einem konstanten langsamen Strome, so wird sie, falls Thorium in dieser enthalten ist, sich mit dessen Emanation beladen.

Joly läßt die Luft wie bei dem Strutt'schen Verfahren in ein Elektrometer als Ionisierungskammer eintreten, wobei die Strömungsgeschwindigkeit so reguliert ist, daß sie die Ablesung des Elektroskopblättchens nicht beeinträchtigt, und bestimmt den Spannungsverlust in der Zeiteinheit bei Sättigungsstrom. Zweckmäßig wird man bei allen Messungen an emanationshaltiger Luft die elektrometrische Vorrichtung von der Ionisierungskammer trennen. Zur Eichung dient eine Thoriumlösung von bekanntem Gehalte. Ein Mangel der Methode in ihrer ursprünglichen Form, der anfangs zu Irrtümern führte, liegt in der Tatsache, daß die Emanation des Thoriums sich nicht unmittelbar aus diesem Elemente entwickelt, sondern daß sich die Zwischenprodukte Mesothorium 1 und 2, Radiothorium und Thor X einschleichen. In den käuflichen Thorsalzen ist das radioaktive Gleichgewicht infolge der langen Halbwertsperiode des Mesothoriums 1 ($5\frac{1}{2}$ Jahr) nicht erreicht (etwa 36 Jahre würden für die Annäherung auf 1 Proz. erforderlich sein), d. h. sie geben eine Emanationsmenge für die Gewichtseinheit Thorium ab, die kleiner ist als bei

1) J. Joly, Phil. Mag. 17, p. 760, 1909.

den natürlichen Mineralien, für die man offenbar das Bestehen des Gleichgewichts anzunehmen hat. Joly benutzte daher später zu der Eichung seines Apparats eine Lösung von Thorianit, eines Thoriumuranoxys aus Ceylon, dessen Thorgehalt durch eine chemische Analyse festgestellt wurde.

Bei der Blanches Methode (Abschn. 5) konnte ebenfalls das Fehlen des radioaktiven Gleichgewichts in den käuflichen Thorsalzen, wodurch ihr Strahlungsvermögen zu klein gefunden wird, zu einer Überschätzung des Thorgehalts des Gesteins führen.

Die von Joly erhaltenen Zahlen liegen für Granite, Gneise und Laven zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ bis $2,8 \cdot 10^{-5}$ g Thorium für das Gramm, als Durchschnittswert kann etwa $2,6 \cdot 10^{-5}$ angenommen werden. Auch hier ist die Übereinstimmung mit der für den Tauerngranit gefundenen Zahl ($3,0 \cdot 10^{-5}$) nach Mache und Bamberger recht befriedigend. Kalkgesteine führen in der Regel nur kaum nachweisbare Spuren von Thorium, dagegen kommen manche Tone und Tonschiefer den Urgesteinen nahe, Quarzsand und Sandstein können noch etwa den halben Betrag der letzteren enthalten (Mittelwert etwa $1,16 \cdot 10^{-5}$). Es hat also auch beim Thorium eine Auslese während der Bildung der sedimentären Gesteine stattgefunden wie beim Radium; der Hauptanteil der aktiven Substanz ist bei den Aluminiumsilikaten verblieben.

Das Gramm und das Kubikzentimeter sind im Vergleich zu Masse und Volumen unseres Planeten sehr kleine Größen. Die für diese Einheiten geltenden Daten entbehren daher leicht der Anschaulichkeit, wenn es sich um Anwendung auf die Erde als Ganzes handelt; eine Umrechnung auf eine größere Volumeneinheit ist daher nicht unzweckmäßig. Für die in einem Kubikkilometer Urgestein enthaltenen Mengen radioaktiver Substanz würden sich aus den angeführten Messungen von Strutt und Joly als Durchschnittswerte ergeben:

Für Radium 6 kg, für Thorium 50 000 t. Dem Radium entsprechen als Gleichgewichtsmenge an Uran 20 000 t, die jederzeit vorhandene Emanationsmenge (bei Normaldruck und 0° C) würde für das Radium 3,6 ccm betragen.

7. Aktinium in Gesteinen. Für das allgemeine Vorkommen des Aktiniums in Gesteinen liegen noch keine ausführlichen Nachweise vor. Nach F. Giesel¹⁾ ist es in der Ackererde von Capri enthalten. Da seine Zugehörigkeit zur Uran-Radiumfamilie nicht zweifelhaft ist, so dürfte es auch in den Felsarten mit jenen Elementen vergesellschaftet vorkommen.

1) F. Giesel, Phys. Zeitschr. 6, p. 205, 1905. (Das Aktinium ist hier unter dem Namen Emanium aufgeführt.)

In den eigentlichen Uranmineralien (Pechblende) läßt es sich durch seine schnell abklingende Emanation direkt nachweisen und mit Sicherheit vom Thorium unterscheiden ¹⁾).

8. Indirekte Bestimmungen der Radioelemente in Gesteinen vermittelt der α -Strahlen. Eine umfangreiche Prüfung der verschiedensten Gesteine auf Radium und Thorium ist von A. G o c k e l ²⁾ begonnen. Ein Teil der Untersuchung, die sich auf die Messung der α -Strahlung der zuvor durch Ausglühen von Radiumemanation befreiten Mineralien gründet, wurde bereits veröffentlicht. Im ganzen bestätigen die Ergebnisse die allgemeine Verbreitung beider Radioelemente in den häufigsten Felsarten. Bedenken gegen die quantitative Brauchbarkeit dieses Verfahrens sind, nicht ohne Berechtigung, von B ü c h n e r ³⁾ erhoben.

9. Die Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums. Nicht übergangen darf schließlich die Radioaktivität der Alkalimetalle Kalium und Rubidium ⁴⁾ bleiben. Die äußerst schwache Strahlung dieser Elemente gehört zur Klasse der β -Strahlen ⁵⁾ ⁶⁾, die des Kaliums ist die härtere. An kaliumreichen Gesteinen, wie den Feldspaten und den Kalisalzen selbst kann sie sehr wohl merklich werden, und, gemessen durch den Sättigungsstrom in einer Ionisierungskammer, eine Größenordnung erreichen, vergleichbar mit der durch den Radium- und Thorgehalt der gewöhnlichen Gesteine bedingten ⁷⁾.

10. Der Emanationsgehalt der Bodenluft. Eine notwendige Folge der allgemeinen Verbreitung des Radiums und Thoriums in den verschiedensten Fels- und Erdarten ist das Auftreten der Emanationen dieser Elemente in derjenigen Luft und den Gasen überhaupt, die in der Erdkruste eingeschlossen sind.

So hat sich der in der Nähe der Erdoberfläche in den Poren des Bodens enthaltene Teil der Atmosphäre, die Bodenluft, an allen Orten der Erde als emanationshaltig erwiesen ⁸⁾).

1) G. v. Hevesy, Phys. Zeitschr. 12, p. 1213, 1911.

2) A. G o c k e l, Jahrb. der Radioakt. u. Elektronik-7, p. 487, 1910.

3) E. H. B ü c h n e r, l. c.

4) N. C a m p b e l l und W o o d, Proc. Cambr. Soc. 14 (1), p. 15, 1906 und 14 (6), p. 557, 1908.

5) E. H e n r i o t und G. V a v o n, C. R. 149, p. 30, 1909.

6) K. B e r g w i t z, Phys. Zeitschr. 14, p. 655, 1913.

7) Ein Bericht über die Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums ist von J. E l s t e r und H. G e i t e l, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 10, p. 323, 1913, gegeben.

8) J. E l s t e r und H. G e i t e l, Phys. Zeitschr. 3, p. 574, 1902.

Zur Gewinnung einer Probe bedient man sich am einfachsten eines bis 60 cm und tiefer in die Erde getriebenen Metallrohres, vermittelt dessen man die Bodenluft in ein vorher mit Wasser gefülltes eiförmiges Glasgefäß einsaugt. Von einer der beiden diametral entgegenstehenden durch Hähne verschließbaren Öffnungen des letzteren führt ein Schlauch zu jenem Rohre, während aus der andern das Wasser in dem Maße ausfließt, wie das Gefäß sich mit Bodenluft füllt. Durch Wasserverdrängung kann diese dann leicht in eine Ionisierungskammer übergeführt werden, in welcher ihr Emanationsgehalt an der die normale der atmosphärischen Luft übersteigenden Leitfähigkeit erkannt wird. Bleibt die Ionisierungskammer dicht verschlossen, so nimmt, nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes zwischen der Emanation und ihren ersten Zerfallprodukten, d. h. nach Verlauf weniger Stunden, die Ionisierung der eingeschlossenen Luft mit einer Halbwertsperiode von nicht ganz vier Tagen ab. Die beigemengte Emanation verhält sich demnach wie die des Radiums. Läßt man die (vorher getrocknete) Bodenluft durch ein mit flüssiger Luft gekühltes Rohr streichen, so zeigt sie keine abnorme Ionisierung mehr, die Emanation hat sich in dem Zuleitungsrohr kondensiert¹⁾. Nach dem Herausnehmen des letzteren aus der flüssigen Luft tritt zugleich mit dem Wiederverdampfen der Emanation und ihrem Eindringen in den Ionisierungsraum eine gesteigerte Leitfähigkeit auf.

Drähte aus beliebigem Material, die man mit negativer Ladung (einem Potential von einigen hundert Volt) in einen mit Bodenluft gefüllten Raum einführt, zeigen nach Verlauf einiger Stunden einen aktiven Beschlag, dessen Abklingung in der Zeit elektrometrisch, d. h. wesentlich mittelst der α -Strahlen gemessen unter Ausschluß der ersten 10 bis 20 Minuten vom Einbringen in die Ionisierungskammer gerechnet, dem von Curie und D a n n e empirisch gefundenen, von Rutherford mittelst der Zerfallskonstanten der Abkömmlinge der Radiumemanation theoretisch begründeten Gesetze folgt:

$$I = I_0 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \right),$$

in welcher Formel I_0 nicht die wahre, sondern die auf die Zeit $t = 0$ extrapolierte Anfangsintensität der Strahlung bezeichnet. Ferner ist $\lambda_1 = 4,33 \cdot 10^{-4}$, $\lambda_2 = 5,93 \cdot 10^{-4}$, λ_1 und λ_2 sind die Zerfallskonstanten von Ra B und Ra C, t ist die Zeit in Sekunden, von dem Moment an gerechnet, in welchem der Draht aus der Bodenluft entfernt wurde²⁾. Die obige einfache Formel reicht im allgemeinen aus, den aktiven Beschlag als den des Radiums zu kennzeichnen. Genauere Formeln, bei denen auch die Dauer

1) H. E b e r t, Münch. Ber. 33, S. 133, 1903.

2) J. E l s t e r und H. G e i t e l, Phys. Zeitschr. 5, S. 11, 1903.

der Exposition berücksichtigt ist, sind ebenfalls von C u r i e und D a n n e ¹⁾, ferner von G r u n e r ²⁾ und B e r n d t ³⁾ angegeben; letzterer berücksichtigt auch die Abnahme der Emanation durch natürlichen Zerfall innerhalb des Raumes, in welchem der aktive Beschlag aus einer a b g e s c h l o s s e n e n Luftmenge gesammelt wurde.

Man hat aus diesen Erfahrungen den Schluß zu ziehen, daß die Bodenluft die Emanation des Radiums enthält. Bei der langen Lebensdauer dieser Emanation lassen sich solche Bestimmungen auch an Gasproben durchführen, die einen mehrtägigen Transport von ihrer Ursprungsstelle aus erfordern. So hat sich z. B. die natürliche Kohlensäure von Burgbrohl am Rhein noch mehrere Tage nach ihrer Entnahme als mit Radiumemanation beladen erwiesen ⁴⁾. Auch die Gasquellen der Geisergebiete auf Island ⁵⁾ und im Yellowstonepark ⁶⁾, sowie das im wesentlichen aus Kohlenwasserstoffen bestehende Erdgas von Neuengamme, Wels ⁷⁾ und nordamerikanischen Fundorten ⁸⁾ führen, wie zu erwarten war, Radiumemanation mit sich.

Es ist ersichtlich, daß bei der beschriebenen Methode, die auch bei schnellem Arbeiten eine Zeit von mehreren Minuten zwischen der Entnahme der Bodenluft und ihrer Untersuchung verstreichen läßt, die kurzlebigen Emanationen des Thoriums oder gar des Aktiniums nicht in merklicher Menge in die Ionisierungskammer gelangen; sie werden, auch wenn sie im Boden enthalten waren, dem unmittelbaren Nachweise entgehen.

Man wird, um dieser kurzlebigen Emanationen habhaft zu werden, die Luft untersuchen müssen, solange sie noch mit dem Erdboden in Berührung ist. Dies kann geschehen, indem man eine Glocke aus Metall oder Glas, die am oberen Ende eine Öffnung enthält, in die Erde eingräbt oder auf den Boden aufsetzt, und durch jene Öffnung die zur Artbestimmung der Emanationen erforderlichen Vorrichtungen einführt. Statt einer in die Erde gegrabenen Glocke kann auch ein künstlich hergestelltes Loch mit senkrechten Wänden ⁹⁾ ¹⁰⁾ oder eine natürliche Bodenspalte, eine Höhle, ein Keller mit nicht untermauertem Fußboden dienen.

1) P. Curie et J. Danne, *Le Radium* 2, p. 210, 1905.

2) P. Gruner, *Ann. der Phys.* 19, p. 178, 1906.

3) G. Berndt, *Ann. der Phys.* 38, p. 970, 1912.

4) J. Elster und H. Geitel, *Phys. Zeitschr.* 4, p. 525. 1903.

5) Thorkel Thorkelson, *Mém. de l'Ak. de Danemark* (7), VIII, p. 227 und 258, 1910.

6) H. Schlundt und R. Moore, *United States Geological Survey Bulletin*, (p. 395, 1909.

7) Emerich Czako, *Zeitschr. für anorg. Chemie* 82, p. 249, 1913.

8) Miss Johnson, *Phys. Rev.* 20, p. 177, 1905.

9) H. M. Dadourian, *Phys. Zeitschr.* 8, p. 98, 1905.

10) J. Muñoz del Castillo, *Boletín del Instituto de Radioactividad Madrid* 4, p. 7, 1912 und 5, p. 33, 1913.

Von Ebert¹⁾ ist ein Verfahren angegeben, durch das in kontinuierlicher Weise der Emanationsgehalt der Bodenluft, ohne Trennung der Radium- und Thoriumemanation an einem bestimmten Orte verfolgt und automatisch registriert werden kann. Messungen und Registrierungen nach dieser Methode sind teils von Ebert und Kurz, teils von Endrös²⁾ und von Kähler³⁾ ausgeführt. Der Grundgedanke des Verfahrens ist folgender: In ein zylindrisches Loch im Erdboden werden zwei voneinander und vom Boden isolierte koaxiale Zylinderflächen aus Metall eingeführt. Der äußere Zylinder, dessen Grundfläche aus Drahtnetz besteht, ist an den einen Pol einer Akkumulatorenbatterie angeschlossen, deren anderer geerdet wird. Der innere Zylinder steht mit einem Elektrometer in Verbindung, durch einen Nebenschluß von großem Widerstande ist dies zur Strommessung eingerichtet. Indem durch den Drahtnetzboden des äußeren Zylinders emanationshaltige Luft in sein Inneres eindiffundiert, wird zwischen den beiden Zylinderflächen ein Strom eingeleitet, der am Elektrometer gemessen oder auch registriert werden kann. Ist die angelegte Spannung hoch genug, um Sättigungsstrom sowohl gegen den inneren Zylinder hin, wie auch gegen die Wände des zylindrischen Loches zu gewährleisten, so werden von den Zerfallsprodukten der Emanationen, die wir sämtlich als positiv geladen voraussetzen (vgl. Abschn. 16), keine durch das Drahtnetz ins Innere dringen. Der am Elektrometer gemessene Strom entspricht daher allein dem Emanationsgehalte der Bodenluft, vermehrt um den Anteil, den die erst im Inneren des Zylinders entstandenen und dort niedergeschlagenen Zerfallprodukte beitragen. Dieser Anteil des Gesamtstromes wird von Zeit zu Zeit bestimmt, indem man, bei positiver Ladung des äußeren Zylinders, den inneren herausnimmt und seine Strahlung in einer besonderen Ionisierungskammer mißt.

Soll die Emanationsentwicklung von einer Erdprobe unter Ausschluß ihrer Umgebung untersucht werden, so bringt man einige Kilogramm davon in einen allseitig geschlossenen Raum von mehrfach größerem Volumen, die darüber stehende Luft nimmt je nach der Größe des Raumes die maximalen Mengen von Emanation in kürzerer oder längerer Zeit auf.

Da die meisten Bodenarten Radiumemanation enthalten, so wird die unmittelbare ionenbildende Wirkung der Thorium- und Aktiniumemanation in der Regel durch diese überdeckt werden. Indessen kann durch einen von Sanderson⁴⁾ angegebenen Kunstgriff die Thoremanation

1) H. Ebert, Phys. Zeitschr. 10, p. 346, 1909.

2) L. Endrös, Dissertation. München, Technische Hochschule 1909.

3) K. Kähler, Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1912. Herausgegeben von R. Süring, Berlin 1913.

4) J. C. Sanderson, Am. Journal of Science 32, p. 171, 1911. Phys. Zeitschrift 13, p. 142, 1912.

neben der[/]des Radiums leicht nachgewiesen und auch gemessen werden. Läßt man Bodenluft in schnellem Strome direkt aus der Erde so lange Zeit durch eine Ionisierungskammer streichen, bis für die Radiumemanation und ihre nächsten Zerfallprodukte Gleichgewicht eingetreten ist, und unterbricht dann den Luftstrom plötzlich, so verrät sich die Gegenwart der Thor-emanation durch einen wenige Minuten andauernden Abfall der Ionisierung, der zur quantitativen Bestimmung der Thoremamanation verwandt werden kann. Man vergleicht zu diesem Zwecke den erhaltenen Effekt mit demjenigen, den man an Luft beobachtet, die zuvor durch eine Lage von Seesand gestrichen war, die mit einer Lösung eines Thorminerals bekannten Gehaltes befeuchtet ist.

Leichter ausführbar ist die Unterscheidung zwischen Thorium- und Radiumemanation mittelst der radioaktiven Beschläge, die aus ihren Zerfallprodukten bestehen, und wie beschrieben, auf negativ geladenen Drähten gesammelt werden können, die man in die zu untersuchende Bodenluft hineinbringt. Man beläßt zu diesem Zwecke den Draht längere Zeit — um die maximale Menge der Thorprodukte zu erhalten, bis zu drei bis vier Tagen¹⁾ — in geladenem Zustande in Berührung mit jener Luft. Alsdann bringt man ihn in eine Ionisierungskammer und beobachtet, wie oben schon angegeben, den Abfall der durch seine Strahlung erregten Leitfähigkeit der Luft in der Zeit. Die Augenbeobachtung kann hierbei durch die automatische Registrierung mittelst des von Ramsauer²⁾ angegebenen „Dekadometers“ ersetzt werden. Man wird im allgemeinen nicht diejenige Abfallkurve erhalten, die der genauen oder — was in der Regel ausreicht — der oben angegebenen genäherten Curie-Danneschen Formel entspricht, und die auf die alleinige Anwesenheit der Radiumemanation schließen ließe. An einen steil abfallenden Teil in den ersten Stunden, schließt sich ein viel schwächer geneigter an, der etwa von der sechsten Stunde an sehr nahe einem Exponentialgesetze folgt in der Art, daß die Ionisierung der Luft durch den Draht in je 10,6 Stunden auf die Hälfte des Anfangsbetrages sinkt. Diese Halbierungskonstante ist die des Thoriums B, des zweiten Zerfallproduktes nach der Thoriumemanation. Indem es selbst in gleichförmiger Weise das nächste kurzlebige und daher starkstrahlende Thorium C entwickelt, prägt es der Abfallkurve des aktiven Beschlages der Thoriumemanation seine eigene Halbierungskonstante auf. Da diese Kurve einen einfachen exponentiellen Charakter hat, so ist es leicht, durch Rechnung oder Zeichnung ihre Rückverlängerung über die ersten Beobachtungsstunden bis zum Anfangspunkt der Zeit festzulegen. Man erhält so neben der beobachteten Kurve eine

1) G. A. Blanc, Rend. Acc. dei Lincei 17 (5), p. 101, 1908.

2) C. Ramsauer, Le Radium 7, p. 223, 1910.

11. Zusammenhang mit dem Gehalt des Bodens an Radium und Thorium. 421

zweite, tiefer liegende, die ausschließlich die den aktiven Abkömmlingen der Thoriumemanation zugehörige darstellt. Durch Subtraktion der Ordinaten der letzteren von denen der ersteren kann man die Wirkung der Produkte aus der Thoriumreihe eliminieren. Man erhält als Differenzkurve eine neue, die von allen radioaktiven Zerfallprodukten der etwa vorhanden gewesenen Emanationen mit Ausnahme von der des Thoriums herrühren muß. Diese Kurve stimmt für die bis jetzt untersuchten Erdarten innerhalb der Beobachtungsfehler mit der für lange Expositionsdauer gültigen Form der Curie - D a n n e s c h e n überein; die nach der beschriebenen Methode im Erdboden aufgefundenen Emanationen sind also allein die des Radiums und des Thoriums ¹⁾.

Daß Aktiniumemanation vorhanden sein muß, ist, wie oben bemerkt, von vornherein wahrscheinlich wegen des gemeinsamen Ursprungs des Aktiniums und des Radiums aus dem Uran. Ihre Nachweisbarkeit wird aber durch die Gegenwart von Radiumemanation aus schon genannten Gründen erschwert ²⁾.

Unmittelbar nach der Auffindung der radioaktiven Emanationen in der Bodenluft lag der Gedanke nahe, daß auch solche noch unbekannter Radioelemente darunter enthalten sein könnten. Diese Erwartung hat sich bis jetzt nicht bestätigt.

11. Der Emanationsgehalt der Bodenluft im Zusammenhange mit dem Gehalt des Bodens an Radium und Thorium. Wie zu erwarten, ist der Gehalt der Bodenluft an Radium- und Thoremanation sehr verschieden, je nach der Natur des Erdreichs, aus dem sie entnommen wird. Quarzsand und Humuserde können fast emanationsfreie Luft einschließen, Ton und Lehmboden geben in der Regel die kräftigsten Anzeichen von Emanationsentwicklung. Auch der relative Gehalt der Radium- zu der Thoremanation ist stark von der Herkunft der Luftprobe abhängig. Nach den Messungen von K ä h l e r ³⁾ (Potsdam), E n d r ö s ⁴⁾ (München), G o c k e l ⁵⁾ (Freiburg, Schweiz), S m y t h ⁶⁾ (Dublin), S a n d e r s o n ⁷⁾ (New-Haven) enthält ein Liter Bodenluft durchschnittlich

1) Eine Methode, nach beliebigen Expositionszeiten die Komponenten einer Abfallkurve zu ermitteln, die den Zerfallprodukten des Radiums, Thoriums und Aktiniums zugleich angehört, hat K. K u r z, Habilitationsschrift, Techn. Hochschule, München 1909, gegeben.

2) K. K u r z (l. c.) hat Anzeichen einer geringen Spur von Aktiniumemanation in der freien Atmosphäre gefunden.

3) K. K ä h l e r, Phys. Zeitschr. 15, p. 27, 1914.

4) L. E n d r ö s, Dissertation. München, Technische Hochschule 1909.

5) A. G o c k e l, Phys. Zeitschr. 9, p. 304, 1908.

6) L. B. S m y t h, Phil. Mag. 24, p. 632, 1912.

7) C. S a n d e r s o n, Phys. Zeitschr. 13, p. 142, 1912.

an Radiumemanation bzw.: $8 \cdot 10^{-12}$; $4 \cdot 10^{-11}$; $7 \cdot 10^{-11}$ bis $2,5 \cdot 10^{-10}$; $1,6 \cdot 10^{-11}$, $2,4 \cdot 10^{-10}$ Curies. (Wo Radium- und Thoriumemanation nicht getrennt gemessen sind, ist der Gesamtbetrag auf Radiumemanation verrechnet.) Für die Thoremamanation aus einem Kubikzentimeter Erde in New-Haven findet S a n d e r s o n die zu $1,3 \cdot 10^{-6}$ g Thorium zugehörige Gleichgewichtsmenge. Dieser Betrag an Thorium ist kleiner als die faktisch in derselben Erde enthaltene Durchschnittsmenge, es wird also nicht alle entstehende Emanation an die Bodenluft abgegeben. Ebenso entspricht nach S a t t e r l y ¹⁾ die Konzentration der in der Cambridger Bodenluft enthaltenen Radiumemanation nur $\frac{1}{7}$ der dem Radiumgehalte desselben Erdbodens zugehörigen Gleichgewichtsmenge. Es ist also nicht allein der Gehalt an Radium und Thorium im Erdboden für den Emanationsgehalt der Bodenluft bestimmend, sondern wie leicht verständlich auch der molekulare Verteilungszustand, in dem sich die Verbindungen der beiden Radioelemente im Erdboden vorfinden.

Das in Steinkohlenflözen eingeschlossene Methan zeigt ebenfalls sehr wechselnden Emanationsgehalt, je nachdem es allein mit der reinen Kohle oder den an Radium reicheren Gesteinsschichten in Berührung gewesen ist. ²⁾

Man kann die zum Nachweise des Emanationsgehaltes in der Bodenluft dienende Methode zu einer quantitativen Schätzung des in der betreffenden Erdart enthaltenen aktiven Materials benutzen, indem man die Wirkung eines Drahtes, der über einer gewogenen Menge jener Erde sich mit aktivem Beschlage bekleidet hatte, mit der eines andern vergleicht, der unter genau gleichen Umständen der Emanation ausgesetzt war, die von einer bekannten Menge eines Radium- oder Thorpräparates entwickelt wurde, das mit einer der vorigen gleichgroßen Masse inaktiver Erde innig vermischt war. B l a n c hat auf diese Weise den Thorgehalt der Ackererde von Rom zu $1,5 \cdot 10^{-5}$ g für das Gramm ³⁾ bestimmt. Vorausgesetzt ist bei diesem Verfahren, daß der aktive Stoff im Erdboden für die Gewichtseinheit genau soviel an Emanation in der Zeiteinheit abgibt, wie das künstliche Präparat. Abgesehen vom Einflusse der molekularen Verteilung trifft dies aber für die Thorpräparate des Handels sicher nicht genau zu (vgl. Abschn. 6), auch beim Radium dürfte es im allgemeinen nicht der Fall sein.

1) J. Satterly, Cambr. Proc. 16, p. 336, 1911.

2) G. von dem Borne, Jahrbuch der Radioaktivität u. Elektronik. 2, p. 106. 1906; J. Schmitt, Diss. Freiburg i. B. 1908.

3) G. A. Blanc, Phys. Zeitschr. 9, p. 294, 1908.

12. Der Emanationsgehalt der flüssigen Bestandteile der Erde, Allgemeines. Da die radioaktiven Emanationen wie alle Gase in einem bestimmten, von ihren Partialdrucken und von der Temperatur abhängigen Verhältnis in Flüssigkeiten löslich sind¹⁾, so gehen sie auch in die flüssigen Bestandteile des Erdkörpers, vor allem das Wasser, aber auch in das Erdöl und wahrscheinlich auch in die glutflüssigen Lavaherde über.

Wegen des zeitlichen Zerfalls der Emanationen, wird ihre Konzentration in den erstgenannten Flüssigkeiten im allgemeinen eine um so größere sein, je näher der Berührungsfläche mit dem starren Erdboden, der eigentlichen Quelle der Emanationen, die Flüssigkeit entnommen wird.

Zutage tretende Wasseradern werden an ihrer Ursprungsstelle emanationsreicher sein als in ihrem weiteren Verlauf, am ärmsten daran wird sich das Wasser an der Oberfläche von Seen, sowie in den obern Schichten der Ozeane erweisen müssen. Von wesentlichem Einfluß ist der Partialdruck der Emanationen in den zuletzt vom Wasser durchflossenen Spalten der Gesteine oder Erdschichten; je niedriger ferner die Temperatur, desto mehr an Emanation vermag das Wasser aufzunehmen.

Die zahlreichen Untersuchungen²⁾ an den verschiedensten Quellen und Gewässern der Erde haben diese aus der Natur der Emanationen zu ziehenden Folgerungen durchaus bestätigt³⁾.

13. Nachweis der Radiumemanation in Wässern und im Erdöl.

Die Methoden zum Nachweise sowie zur quantitativen Bestimmung des Emanationsgehaltes der Wässer beruhen, abgesehen von dem auch in diesem Falle durchaus verwendbaren Verfahren des Auskochens⁴⁾ (Abschn. 4), auf einem schon von den Entdeckern Sella und Pocchettino⁵⁾ im Prinzip angewandten Vorgange, nämlich durch innige Berührung von Luft mit der zu untersuchenden Wasserprobe das Gleichgewicht des Druckes der Emanation in Luft und Wasser herzustellen, und in der ersteren dann die Emanation qualitativ und quantitativ nach der schon beschriebenen Methode zu bestimmen.

1) F. Himstedt, Ber. d. Naturforsch. Gesellschaft zu Freiburg i. Br. 14, p. 181, 1903; R. v. Traubenberg, Phys. Zeitschr. 5, p. 130, 1904.

2) Die Literatur über Radioaktivität von Quellwässern ist äußerst umfangreich. Die deutschen und österreichischen Quellen sind untersucht u. a. von C. Engler u. H. Sieveking, A. Schmidt, F. Henrich, K. Aschoff, H. Mache u. St. Meyer, M. Bamberger.

3) H. Mache, Comptes Rendus du Congrès Intern. de Radiologie. Brüssel 1910. p. 540.

4) J. v. Wesselsky, Phys. Zeitschr. 13, p. 244, 1913; H. Greinacher, Phys. Zeitschr. 13, p. 435, 1912.

5) A. Sella und J. Pocchettino, Rend. Acc. dei Lincei 2 (5), p. 527, 1902.

An erster Stelle ist die Zirkulationsmethode ¹⁾ zu nennen, bei der Luft in kontinuierlichem in sich zurückkehrenden Ströme durch das Wasser und die zur Messung des Emanationsgehaltes dienende Ionisierungskammer, zweckmäßig unter Vorschaltung eines Kondensators, der die beim Zerspritzen des Wassers gebildeten Ionen zurückhält, geleitet wird. Bequemer in der Handhabung ist das von Engler und Sieveking ²⁾ ausgebildete Schüttelverfahren mittelst des „Fontaktoskops“, zu dem neuerdings Vervollkommungsvorschläge von Hammer ³⁾ gemacht sind. Eine gemessene Wasserprobe wird in einer Metallflasche von mindestens zehnmal größerem Volumen mit Luft kräftig durchgeschüttelt. Die Flasche dient dann selber als Ionisierungskammer oder gibt ihren Luftinhalt nach dem Durchschütteln in eine solche ab, ⁴⁾ der Emanationsgehalt der Luft wird bei beiden Verfahren dem Sättigungsstrom proportional gesetzt. Korrekturen sind anzubringen für die im Wasser verbliebene Emanationsmenge — die aus dem Löslichkeitskoeffizienten nach dem Dalton'schen Gesetz berechnet wird, indem für gleiche Volumina von Luft und kaltem salzfreien Wasser das Verhältnis der darin enthaltenen Emanationsmengen gleich 1 : 3 gesetzt werden darf — sowie für die ionisierende Wirkung der während des Verfahrens auf den Gefäßwänden entstehenden Zerfallprodukte der Emanation. Man bestimmt zu diesem Zweck den Sättigungsstrom nach Ausblasen der emanationshaltigen Luft und subtrahiert diesen von dem Gesamtbetrage. Von Schmidt ⁵⁾ und Berndt ⁶⁾ sind Tabellen berechnet, die denjenigen Anteil des gesamten Sättigungsstromes angeben, der zu beliebiger Zeit von der Emanation allein unterhalten wird. Nach etwa fünf Stunden beträgt dieser 46 Proz. der Gesamtintensität. Mittelst der Zerfallskonstante der Emanation kann auf den Anfangszustand rückwärts extrapoliert werden. Den durch die unvollkommene Ausnutzung der α -Strahlen der Emanation entstehenden Fehler beseitigt man mit guter Annäherung durch eine von W. Duane angegebene Korrektur, nämlich durch Multiplikation der für den Sättigungsstrom erhaltenen Intensität mit dem Faktor $\frac{1}{1 - 0,52 \cdot O/V}$, wenn O die Oberfläche, V das Volumen der Flasche bezeichnet; die Längeneinheit ist in beiden Fällen das Zentimeter. Eine eingehende Darstellung der verschiedenen Korrekturen findet sich bei G. Berndt, l. c.

1) H. Mache und St. Meyer, Phys. Zeitschr. 6, p. 692, 1905.

2) C. Engler und H. Sieveking, Zeitschr. für anorg. Chemie 53, p. 1, 1907.

3) W. Hammer, Phys. Zeitschr. 13, p. 943, 1912.

4) A. Becker, Zeitschr. für Instrumentenkunde 30, S. 293, 1910.

5) H. W. Schmidt, Phys. Zeitschr. 6, p. 561, 1905.

6) G. Berndt, Ann. d. Phys. 38, p. 958, 1912.

Wie bei der Bestimmung des Emanationsgehalts der Bodenluft kann durch die beiden Methoden nur die Emanation des Radiums sicher nachgewiesen werden, die andern entgehen dem Beobachter infolge der Kürze ihrer Umwandlungsperioden, wenn nicht das Wasser Thor in Lösung enthält.

Auch das natürliche Petroleum¹⁾ enthält nach seiner Entnahme aus der Quelle Radiumemanation, die durch Ausschütteln gewonnen werden kann. Da sie in den Kohlenwasserstoffen, die das Rohpetroleum bilden, bei weitem (etwa 30mal) löslicher ist als im Wasser²⁾, so wird unter sonst gleichen Umständen Petroleum mehr Emanation als Wasser mit sich führen.

14. Maßbestimmungen der Emanation in Wässern, Extreme des Emanationsgehalts. Sowohl aus rein wissenschaftlichem Interesse, aber auch in Rücksicht auf das Bedürfnis der Verwaltungen der zu Heilzwecken dienenden Thermalquellen, vergleichende Angaben über den Emanationsgehalt ihrer Wässer zu besitzen, ist der Wunsch nach einem brauchbaren, vom angewandten Apparate unabhängigen Maße früh hervorgetreten.

Benutzt man bei der Zirkulationsmethode zu allen Bestimmungen ein und dieselbe Ionisierungskammer, die mit dem zur Messung dienenden Elektroskope ein System von nahe unveränderlicher Kapazität bildet, läßt man ferner immer das gleiche Luftquantum bei konstantem Volumen des zu untersuchenden Wassers durch die Ionisierungskammer zirkulieren, ist man sicher, daß in der letztern auch bei den niedrigsten der abgelesenen Spannungen nahe Sättigungsstrom besteht, (völlig ist dieser Zustand bekanntlich bei jeder durch α -Strahlen hervorgerufenen Ionisierung nicht erreichbar) und bringt man schließlich die übrigen schon genannten Vorsichtsmaßregeln und Korrekturen an, so kann man die in der Zeiteinheit am Elektroskope beobachtete Spannungsabnahme in Volt als relatives Maß des Sättigungsstromes, also auch des Emanationsgehaltes der Wasserprobe betrachten, das gleiche gilt für das Schüttelverfahren. Dies für eine bestimmte Apparatur geltende Maß ist nur mittelst eines an Wasserproben konstanten Emanationsgehaltes bestimmten Reduktionsfaktors auf andere Anordnungen desselben Prinzips übertragbar. Angaben über den Emanationsgehalt von Wässern in „Volt“ als Einheit ohne Bezugnahme auf eine unveränderliche Apparatur haben auch als relatives Maß keinen Sinn.

Bei weitem rationeller ist das von M a c h e vorgeschlagene Maßsystem, bei dem als Einheit derjenige Sättigungsstrom gewählt ist, der ein Tausendstel einer elektrostatischen Einheit beträgt.

1) F. H i m s t e d t, l. c.

2) v. T r a u b e n b e r g, l. c.; R. H o f f m a n n, Phys. Zeitschr. 6, p. 337, 1905.

Die Angabe, ein Wasser enthalte eine Anzahl n von Machееinheiten, bedeutet, daß die in einem Liter gelöste Emanationsmenge, mit Luft gemischt, bei voller Ausnützung ihrer Strahlen in dieser eine Ionisierung bewirkt, die einen Sättigungsstrom von n -Tausendstel elektrostatischen Einheiten ($n \cdot 3,3 \cdot 10^{-13}$ Ampère) unterhalten würde. Eine von den Dimensionen des Apparates vollkommen unabhängige Maßeinheit ist allerdings hiermit auch noch nicht erreicht, da die Größe der Ionisierungskammer (auch ihre Form) insofern von Einfluß ist, als sie, wie oben bemerkt, eine ungleiche Ausnutzung der von der Emanation ausgehenden α -Strahlung bedingt. Sofern die Ionisierungskammer einen Zylinder bildet, dessen Höhe dem doppelten Durchmesser gleich ist, kann die oben genannte D u a n e s c h e Korrektur (Abschn. 13) als ausreichend angesehen werden.

Die natürliche Einheit zu quantitativen Angaben über Mengen von Radiumemanation bildet offenbar derjenige Betrag, der mit der Gewichtseinheit (1 g) reinen Radiums im Gleichgewicht steht. Nach Beschluß des Kongresses für Radiologie in Brüssel 1910 wird diese Einheit bekanntlich mit dem Namen „Curie“ bezeichnet.

Da ein Curie Ra -Emanation in Luft normaler Dichte einen Strom von $2,75 \cdot 10^6$ elektrostatischen Einheiten unterhält, so berechnet sich die Emanationsmenge, die einem Tausendstel einer elektrostatischen Einheit entspricht, zu $3,64 \cdot 10^{-10}$ Curie, dieser Betrag ist als das Äquivalent der Machееinheit zu betrachten. Nach einem Vorschlage von St. Meyer¹⁾ könnte man die schon sehr verbreitete Machееinheit als Konzentrationsmaß für die Emanation in Wässern beibehalten und sie als $3,64 \cdot 10^{-10}$ Curie im Liter definieren.

Durch Eichung eines Messungsapparates für Emanation mittelst einer im Gleichgewicht befindlichen Lösung bekannten Radiumgehalts läßt sich die Reduktion der erhaltenen Ergebnisse auf dies so definierte Maß ausführen. Von A. Becker sind die Bedingungen angegeben, unter denen diese Eichung an der von ihm konstruierten bequemen Meßvorrichtung, dem „Emanometer“, auszuführen ist.²⁾

Es ist zu wünschen, daß es gelingen wird, Normallösungen von Radiumchlorid von bekanntem Radiumgehalt in haltbarer Form herzustellen, mittelst derer dann die emanometrischen Vorrichtungen zu eichen wären. Die große Schwierigkeit liegt in dem hohen Verdünnungsgrade, der für diese Lösungen erfordert wird. Adsorption der winzigen Radiummengen an der Wand des Aufbewahrungsgefäßes, Ausfällung des Radiums durch sulfathaltigen Staub, der in die Lösung gelangen kann, und dadurch

1) St. Meyer, Zeitschr. für Balneologie 6, p. 1, 1913.

2) A. Becker und C. Ramsauer, Über radioaktive Meßmethoden und Einheiten, Heidelberg 1914.

bewirkte Okklusion der Emanation sind die Hauptfehlerquellen, gegen die man zu kämpfen hat. Auf jeden Fall ist den Lösungen eine kleine Menge Salzsäure zuzusetzen.

Die in Thermalquellen enthaltenen Emanationsmengen erreichen, wie in den Gasteinen, etwa $6,1 \cdot 10^{-8}$ Curie im Liter oder 150 Machееinheiten, bis zum 10fachen dieses Betrages steigt der Gehalt in den Grubenwässern der Bergwerke, aus denen Uranerze gefördert werden. Bei von der Oberfläche abgeschöpftem Seewasser liegen sie zwischen $5 \cdot 10^{-11}$ bis 10^{-12} Curie im Liter, betragen also nur kleine Bruchteile der Machееinheit.^{1) 2) 3)}

Die Bestimmung der Thoriumemanation in Wässern neben der des Radiums ist wegen ihres schnellen Zerfalles nach den geschilderten Methoden kaum ausführbar. Für den Fall, daß ein reichlicher Strom von Quellgasen zugleich mit dem Wasser zutage tritt, ließe sich bei solchen Gasen das von S a n d e r s o n (Abschn. 10) für die Bodenluft angegebene Verfahren anwenden.

Ein starker Abfall des Sättigungsstroms bei dem Schüttelverfahren innerhalb der ersten Minuten deutet keineswegs mit Sicherheit auf die Anwesenheit von Thoriumemanation hin, vielmehr liegt im wesentlichen die schon erwähnte Ionisierung der Luft durch das zerspritzende Wasser (L e n a r d e f f e k t) vor. H a m m e r und V o h s e n⁴⁾ vermuten, daß die festen Zerfallprodukte der Ra-Emanation beim Schütteln durch kleinste Wassertröpfchen aufgenommen und kurze Zeit in der Luft schwebend erhalten werden. Nach Engler, Sieveking und König reicht der L e n a r d e f f e k t zur Erklärung der genannten Störung aus.⁵⁾

15. Spuren gelöster Radioelemente in Wässern, aktive Sedimente, Radiumgehalt des Meerwassers. Wie oben bemerkt, besteht die in einem natürlichen Wasser gelöste Radiumemanation der Hauptsache nach aus den Mengen, die es auf seinem Wege durch die Erde aufgenommen hat, sie steigt mit dem Partialdrucke der Emanation in der Luft oder den andern Gasen, mit denen das Wasser in Berührung gewesen ist.

Ist das Wasser durch langes Stehen infolge der Umwandlung der Emanation oder durch Auskochen und Ausschütteln mit Luft davon befreit, so findet keine Neubildung von Emanation statt, das Wasser hat seine Aktivität verloren.

1) J. S a t t e r l y, Cambridge Proc. 16, p. 336, 1911.

2) J. L a u b, Phys. Zeitschr. 14, p. 81, 1913.

3) W. K n o c h e, Phys. Zeitschr. 13, p. 112, 1912.

4) W. H a m m e r und F. r. V o h s e n; Phys. Zeitschr. 14, p. 451, 1913.

5) C. Engler, H. Sieveking und A. König, Phys. Zeitschr. p. 15 441, 1914 und Chemiker-Zeitung 40, p. 425, 1914.

Anders dagegen, wenn es gewisse Mengen von Radium, Thörum oder Mesothorium in Lösung mit sich führt, dann vermag es eine bestimmte Emanationsmenge neu zu bilden, die eben dem radioaktiven Gleichgewicht mit der gelösten Muttersubstanz entspricht. Dieser Fall tritt ein bei einigen heißen Quellen; solche Wässer regenerieren von selbst einen — im Vergleich zu ihrem unmittelbar nach dem Zutagetreten feststellbaren Gehalte — sehr kleinen Betrag von Emanation. So enthält das Wasser der Rudolfsquelle in Gastein im Liter $142 \cdot 10^{-12}$ g Radium und $29 \cdot 10^{-5}$ g Thorium gelöst¹⁾.

Bilden sich im Quellstrange selbst oder in dem Sammelbecken an ihrem Ursprung Niederschläge oder Sinter, so zeigen diese ebenfalls eine dauernde Radioaktivität, die, wenn die Masse der aus einem bestimmten Volumen des Wassers sich absetzenden Sedimente klein ist, infolge der größeren Konzentration des darin enthaltenen Radiums oder Thoriums und Mesothoriums sehr merklich sein kann. Zu diesen, den Uranerzen an Radiumgehalt vergleichbaren Sedimenten gehört der im wesentlichen aus Manganoxyden bestehende Reissacherit von Gastein, und der radiumhaltige Schwerspat der Karlsbader Thermen.²⁾ Bei dem erstgenannten Minerale ist die Fixierung des Radiums auf Adsorption an dem kolloiden Manganoxyd zurückzuführen. Der im Laufe der Zeit dem Wasser durch derartige Sedimente entzogene und in ihnen aufgespeicherte Vorrat an Radium trägt in sehr wesentlichem Betrage zu dem hohen Emanationsgehalte jener Quellen bei.

Die Radioaktivität der Quellsedimente ist zuerst an dem sog. „Fango“ der heißen Quellen von Battaglia bemerkt.³⁾

Daß bei Gegenwart des Thoriums und seiner nächsten Abkömmlinge, speziell des Mesothoriums und Radiothors in den Sedimenten auch die Thoriumemanation neben der des Radiums in dem Wasser anwesend sein wird, ist ohne weiteres einleuchtend. Im allgemeinen ist der Meso- und Radiothorgehalt der Quellsedimente größer, als es der Gleichgewichtsmenge des nachweisbaren Thoriums entspricht^{4) 5) 6)}.

Von Ramsauer⁷⁾ ist ein Verfahren ausgearbeitet, aus aktiven Sedimenten die Umwandlungsprodukte des Radiums, Thoriums und Aktiniums

1) Mache und Bamberger, l. c.

2) H. Mache, Wien. Ber. 113, p. 1329, 1904 u. J. Knett, Wien. Ber. 113, p. 753, 1904.

3) J. Elster u. H. Geitel, Phys. Zeitschr. 5, p. 16. 1903; Rep. Brit. Assoc. Southport p. 537. 1903.

4) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 6, p. 67, 1905.

5) G. A. Blanc, Phys. Zeitschr. 6, p. 703, 1905.

6) Mache und Bamberger, l. c.

7) A. Becker und C. Ramsauer, Über radioaktive Meßmethoden und Einheiten. Heidelberg 1914.

durch Erhitzen auszutreiben und aus der Analyse der Abfallskurve eines durch Sublimation gewonnenen Beschlages den Gehalt des Sediments an Radium, Thorium X und Aktinium X zu bestimmen. Auf die Tonne Kreuznacher Sinters kommen danach z. B.: 1,73 mg Ra., $1,88 \cdot 10^{-6}$ mg Th. X, $4,80 \cdot 10^{-6}$ mg Ac. X.

Bemerkenswert ist, daß auch das Wasser der Ozeane in minimalem Betrage radiumhaltig ist, und daher von selbst dauernd Emanation entwickelt. Die in einem Kubikzentimeter gelöste Menge an Radium, bestimmt aus der Gleichgewichtsmenge an Emanation, beträgt nach J o l y ¹⁾ zwischen 10^{-14} bis $4 \cdot 10^{-14}$ g, E v e ²⁾ findet Beträge, die näher an 10^{-15} g herankommen. Da das Meerwasser Sulfate gelöst enthält, durch die das Radium bei Gegenwart der kleinsten Spuren von Barium ausgefällt wird, so ist allerdings von vornherein nur ein sehr kleiner Maximalbetrag von gelöstem Radiumsalz in der Volumeneinheit möglich; überdies wird das Radium durch Adsorption an kolloiden im Meerwasser verbreiteten Stoffen fixiert werden ³⁾.

16. Der Emanationsgehalt der Atmosphäre, Allgemeines. Da die Atmosphäre unseres Planeten in dauerndem Gasaustausche sowohl mit der Bodenluft steht, wie mit den im Wasser der Ozeane gelösten gasförmigen Stoffen, so müssen die radioaktiven Emanationen zugleich mit ihren Zerfallprodukten auch in der freien Luft enthalten sein. Sie bedingen neben der von den aktiven Bestandteilen des Erdkörpers ausgehenden β - und γ -Strahlung eine seit den ersten Anfängen der elektrischen Forschung bekannte Erscheinung, die Elektrizitätszerstreuung von geladenen Körpern aus, die eben nichts anderes als eine Folge der ständigen Ionisierung ⁴⁾ ⁵⁾ der atmosphärischen Luft durch jene Einflüsse ist.

Die radioaktiven Emanationen gehören demnach zu den normalen Bestandteilen der Luft, doch entsprechen ihre Mengen nicht einem konstanten Zustande, demzufolge sie für dieselbe Höhenstufe überall in gleichem Mischungsverhältnis zu dem Stickstoff und Sauerstoff, wie etwa die seltenen Gase, anzutreffen wären, sondern sie sind örtlich und zeitlich in verschiedenen Konzentrationsgraden der Luft beigemischt. Sie teilen dies Verhalten etwa mit dem Ozongehalt der Atmosphäre, die Ursache liegt, wie leicht ersichtlich, in beiden Fällen in der Unbeständigkeit

1) J. J o l y, Phil. Mag. 15, p. 385, 1908.

2) A. S. E v e, Phil. Mag. 18, p. 107, 1909. Vgl. auch W. K n o c h e, Phys. Zeitschr. 13, p. 112, 1912.

3) E. E b l e r, Verh. der Ges. deutscher Naturforscher u. Ärzte, Karlsruhe 2. p. 192. 1912.

4) H. G e i t e l, Phys. Zeitschr. 2, p. 116, 1900.

5) C. T. R. W i l s o n, Proc. Cambr. Phil. Soc. 11, p. 32, 1900.

der Substanzen und der örtlich verschiedenen Ergiebigkeit ihrer Quellen. Teils stammen die Emanationen in der Luft aus den obersten Schichten des Erdbodens selbst, teils aus größerer Tiefe, von wo aus sie infolge ihres Konzentrationsgefälles oder von Luftdruckschwankungen emporsteigen, zu gewissem sehr kleinen Teile auch aus dem Wasser der Ozeane. Da die in der Zeiteinheit von diesen verschiedenen Emanationsquellen abgegebenen Mengen von Ort zu Ort ungleich, und auch durch den zeitlich veränderlichen Luftdruck mitbestimmt sind, so wäre dadurch schon die Verschiedenheit des Emanationsgehaltes der Luft nach Ort und Zeit verständlich, selbst wenn man den Transport durch Luftströmungen außer acht ließe. Da ferner während dieses Transportes vom Ursprungsorte aus die Emanationen ihren Halbierungskonstanten entsprechend verschwinden, so werden die kurzlebigsten, d. h. die des Thoriums und des Aktiniums, nur in seiner unmittelbaren Nähe vorhanden sein, also die schärfsten lokalen Konzentrationsunterschiede in horizontaler Richtung aufweisen. Aber auch in der Vertikalen gelangen die letzteren beiden nur in beschränkte Höhenstufen; die höheren Schichten der freien Atmosphäre enthalten von radioaktiven Emanationen nur die des Radiums ^{1) 2)}, auf Berggipfeln kann wegen der Nähe des Gebirgsmassivs auch die des Thoriums bemerkbar werden ^{2) 3)}.

Anderseits werden auch die Zerfallprodukte der Emanationen, unter diesen das verhältnismäßig langlebige Thorium *B* durch Luftströmungen von ihrem Ursprungsorte weggeführt. Wir haben uns diese Produkte als feste Körper im Zustande feinsten Verteilung in der Luft schwebend zu denken, von molekularen Dimensionen an bis zu der Größenordnung des sichtbaren Staubes (durch Adsorption an inaktiver Substanz). Sie sind teils in elektrisch neutralem Zustande, teils mit einer Eigenladung behaftet, die in überwiegendem Maße — wenigstens für Thorium *B* und Radium *A* — positiv ist (infolge der Aussendung negativer Elektronen in den δ -Strahlen), aber auch durch Aufnahme negativer Ionen aus der Luft entgegengesetzt sein kann ⁴⁾.

Für den Fall des Gleichgewichts der Emanation mit ihren Zerfallprodukten in Luft ist nach Frau Curie ⁵⁾ das Verhältnis der Anzahl der

1) H. Fleming, Phys. Zeitschr. 9, p. 801, 1908.

2) J. Jauffmann, Beob. der meteorol. Stationen im Königreich Bayern p. 29, 1907.

3) A. Gockel, Phys. Zeitschr. 8, p. 701, 1907; A. Gockel und Th. Wulf, Ibid. 9, p. 907, 1908.

4) Nach Wellish und Bronson entstehen negative Träger aus Ra-Emanation unmittelbar überhaupt nicht. M. Wellish und H. L. Bronson, Phil. Mag. 23, p. 714, 1912.

5) Frau Curie, Die Radioaktivität. Bd. 2, p. 483, 1911.

ungeladenen Teilchen zu der der positiv geladenen der Wurzel aus der Konzentration der Emanation proportional, man wird also verhältnismäßig um so weniger ungeladene erwarten müssen, je weniger an Emanation der Luft beigemischt ist. Bei der ungemeinen Verdünnung der Emanationen in der freien Atmosphäre ist es daher mit einiger Annäherung zulässig, die Anzahl der ungeladenen Teilchen von Radium A und Thorium B ganz zu vernachlässigen. (Vgl. dazu Abschn. 24.)

17. Direkte Messung der Radiumemanation in der Luft. Zur Messung des Emanationsgehaltes der atmosphärischen Luft kann man ein direktes oder ein indirektes Verfahren einschlagen.

Im ersten Falle wird eine gemessene Luftmenge ihrer Emanation dadurch beraubt, daß man sie über Kokosnußkohle oder durch ein von flüssiger Luft umgebenes Rohr leitet, auch auf -20°C gekühltes Petroleum ist als Absorptionsmittel vorgeschlagen¹⁾. Die Kohle hat ein ausgezeichnetes Adsorptionsvermögen für die Radiumemanation, während die Abkühlung bis auf -180°C deren vollständige Kondensation bewirkt. Durch Glühen der Kohle sowie durch Erwärmen des Rohres, in dem die Emanation kondensiert war, kann man sie wieder in Freiheit setzen und zur quantitativen Bestimmung in eine Ionisierungskammer leiten. Den Fehler, der durch eine unvollständige Adsorption der Emanation in der Holzkohle entsteht, bestimmt man durch einen Parallelversuch mit Luft, deren Emanationsgehalt bekannt ist. Versuche von Eve²⁾, Ashman³⁾ und Satterly⁴⁾ in Montreal, Chicago und Cambridge (England) haben in merkwürdig gut übereinstimmender Weise ergeben, daß ein Kubikzentimeter atmosphärischer Luft $60 \cdot 10^{-18}$, $89 \cdot 10^{-18}$, $105 \cdot 10^{-18}$ Curie an Radiumemanation enthält, dem entspricht eine Produktion von etwa zwei bis drei Ionen für die Sekunde und das Kubikzentimeter Luft, wenn wir außer der α -Strahlung der Emanation auch die der Gleichgewichtsmengen ihrer Zerfallprodukte in Rechnung ziehen⁵⁾ ⁶⁾. Da in einem Curie $1,63 \cdot 10^{16}$ Atome der Emanation enthalten sind, kommt etwa ein Atom Radiumemanation auf ein Kubikzentimeter Luft. Wright und Smith⁷⁾ haben vergleichende Messungen des Emanationsgehaltes der Luft in Manila und auf dem unweit gelegenen Mt. Pauai (2460 m) nach der Adsorptions-

1) R. Hofmann, Phys. Zeitschr. 6, p. 340, 1905.

2) A. S. Eve, Phil. Mag. 16, p. 22, 1908.

3) G. C. Ashman, Sill. Journ. 26, p. 119, 1908.

4) J. Satterly, Phil. Mag. 16, p. 84, 1908; 20, p. 1, 1910.

5) Frau Curie, Die Radioaktivität 2, p. 519, 1910.

6) A. S. Eve, Phil. Mag. 21, p. 26, 1911.

7) J. R. Wright und O. F. Smith, Phys. Zeitschr. 15, p. 31, 1914.

methode mittelst Kohle vorgenommen. Als Mittel ergab sich für Manila $82,5 \cdot 10^{-18}$, für Mt. Pauai $19 \cdot 10^{-18}$ Curie.

18. Indirekte Bestimmung mittels des aktiven Niederschlages. Allgemeines. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß eine Bestimmung der Thoriumemanation in der Luft nach der soeben genannten Methode nicht möglich ist, hier führt nur das auch für die Radiumemanation anwendbare indirekte Verfahren zum Ziele, das auf der Herstellung radioaktiver Niederschläge auf negativ geladenen Drähten beruht und zugleich auch zu dem Versuche einer annähernden Feststellung des Verhältnisses der in der Volumeneinheit Luft enthaltenen Atomzahlen der Radiumemanation zu der des Thoriums verwendet worden ist.

Streng genommen hat man es bei dieser indirekten Messung des Emanationsgehaltes der Luft mit einem äußerst verwickelten Vorgange zu tun, der nur unter vereinfachenden Annahmen übersehen werden kann. Man erkennt, daß die Aktivität einer bestimmten Drahtlänge (etwa 1 m), gemessen durch den von ihr unterhaltenen Sättigungsstrom, außer von dem Gehalt der Luft an Radium- und Thoriumemanation, abhängig ist von der Zeitdauer, während welcher der Draht mit negativer Ladung der Luft ausgesetzt war, von der Höhe seines Potentials, von der Größe des disponibelen Luftvolumens, von dem Verhältnis der Anzahl der positiv geladenen Teilchen des aktiven Niederschlages in der Volumeneinheit Luft zu der der negativen und neutralen, von der Beweglichkeit jener Träger, ja auch von dem Ionengehalt der Luft, der die Eigenladung der aktiven Teilchen zum Teil neutralisiert und der selbst wieder von der Dichte des auf dem Drahte gesammelten aktiven Beschlages abhängt. Ist der Draht im Freien ausgespannt, so kommt sein Abstand von der Erdoberfläche, die Intensität des elektrischen Feldes der Erde¹⁾ und in gewissen Grenzen die Stärke der Luftbewegung mit in Betracht, da durch Wind die den Draht umgebende Hülle von stärker ionisierter Luft beiseite getrieben wird.

Unter denjenigen von den genannten Faktoren, die unserer Willkür entzogen sind, hat die Beweglichkeit der positiv geladenen Teilchen des aktiven Niederschlages, d. h. die Strecke, die sie bei der Potentialdifferenz von 1 Volt auf das Zentimeter in einer Sekunde zurücklegen, einen sehr wesentlichen Einfluß auf die Menge des in einer gegebenen Zeit gesammelten aktiven Beschlages. Man kann versuchen, diesen Einfluß von vornherein zu eliminieren, oder ihn nach Messung jener Beweglichkeit in Rechnung zu ziehen.

1) J. Salpeter, Wien. Ber. 189, p. 1163, 1909 u. 109, p. 108, 1910.

19. Aktiver Niederschlag aus begrenzten Lufträumen. Einen Versuch in der ersten Richtung hat A. S. Eve¹⁾ in Montreal, Kanada, gemacht, indem er Freiluft in einen metallenen Zylinder einschloß, in dessen Achse ein auf sehr hohes negatives Potential geladener Draht ausgespannt war. Es läßt sich auf diese Weise erreichen, daß die gesamten positiv geladenen Zerfallprodukte der Radiumemanation, die in diesem Raume vorhanden waren und die während der Versuchsdauer entstehenden auf dem Drahte abgelagert werden. Durch Messung des nach Erreichung des stationären Zustandes von der Längeneinheit des Drahtes unterhaltenen Sättigungsstromes und durch Vergleichung dieses Betrages mit demjenigen, den man erhält, wenn derselbe Zylinder mit Luft von einem bekannten, willkürlich zugesetzten sehr kleinen Gehalt an Radiumemanation gefüllt war, läßt sich die im Kubikzentimeter der atmosphärischen Luft enthaltene Emanationsmenge bestimmen. Es fand sich als Mittel aus vielen Versuchen, daß sie der Gleichgewichtsmenge mit $5 \cdot 10^{-16}$ Gramm Radiumbromid oder $240 \cdot 10^{-18}$ Curie entsprach; die Zahl ist wesentlich größer, als die am gleichen Orte mittelst des Adsorptionsverfahrens gefundene. (Abschn. 17.)

20. Bestimmung der Beweglichkeit der radioaktiven Träger. Eine Methode zur Messung der Beweglichkeit der positiv geladenen Träger der atmosphärischen Radioaktivität verdankt man H. Gerdien²⁾. Durch einen Zylinderkondensator, zwischen dessen Belegungen eine gemessene Potentialdifferenz hergestellt ist, wird mittelst eines Aspirators ein Luftstrom gesaugt. Ist die innere Belegung negativ geladen, so beschreiben die positiven Träger unter gleichzeitiger Einwirkung des sie fortführenden Luftstromes und des elektrischen Feldes Parabelbögen, die bei gleicher anfänglicher Entfernung von der Zylinderachse um so näher der freien Öffnung des Kondensatorrohres die innere Belegung schneiden, je größer die Beweglichkeit dieser Teilchen ist. Es wird demnach, sofern Träger innerhalb eines stetig zusammenhängenden Geschwindigkeitsbereiches vorhanden sind, die Dichtigkeit des radioaktiven Niederschlages auf der inneren Belegung von der Öffnung an stetig abnehmen, wenn man nur die in der eintretenden Luft schon vorgebildeten, nicht auch die während des Durchströmens im Kondensatorrohre erst entstehenden viel weniger zahlreichen Träger in Betracht gezogen denkt. War nun die innere Belegung mit einer Papierlage überzogen, so werden die verschiedenen Teile dieses Überzuges, in einer Ionisierungskammer untersucht, eine um so kleinere Aktivität zeigen, je weiter zurück sie in dem

1) A. S. Eve, Phil. Mag. 10, p. 99, 1905.

2) H. Gerdien, Abh. d. Kgl. Ges. d. Wiss. in Göttingen. 5. Nr. 5, 1907.

Kondensatorrohre lagen. Aus der Abnahme der gemessenen Aktivität von der Kondensatoröffnung an, den Radien der äußeren und inneren Belegung, der angelegten Potentialdifferenz und der Geschwindigkeit des Luftstromes läßt sich die Beweglichkeit der Aktivitätsträger berechnen. Gerdien findet so für die positiv geladenen Produkte der Radiumemanation Zahlen, die zwischen 25 und $25 \cdot 10^{-7}$ cm liegen. Der Hauptanteil fällt in das Intervall von den größten Geschwindigkeiten an bis 1 cm. Nun ergibt sich durch Versuche an abgeschlossenen Mengen von trockner staubfreier, emanationshaltiger Luft die Beweglichkeit der positiven aktiven Träger als etwa von derselben Größe wie die der Ionen, nämlich zu 1,4 cm. Die zum Teil weit größere Beweglichkeit der Träger in der freien Atmosphäre ist ohne Zweifel darauf zurückzuführen, daß sie teilweise mit einem hohen Vielfachen der elektrischen Elementarladung behaftet sind, wie ja auch Nebelteilchen in der Nähe des Erdbodens unter dem Einfluß des elektrischen Feldes der Erde abnorm hohe positive Ladungen aufnehmen. — Die kleineren Beweglichkeiten erklären sich ohne weiteres durch Adsorption der aktiven Träger an Staubteilchen.

Auch die Abkömmlinge der Thoriumreihe machten sich bemerklich, ihre Beweglichkeiten wurden zwischen 15 bis 0,2 cm liegend nachgewiesen. Negativ geladene Partikeln kamen ebenfalls vor, allerdings in einer zu genauer Messung nicht ausreichenden Menge. Die ungeladenen Produkte lassen sich, wie ersichtlich, durch diese Methode überhaupt nicht nachweisen.

Jedenfalls ist es nicht zulässig, von einer konstanten Beweglichkeit der Träger der atmosphärischen Aktivität zu sprechen.

21. Theorie der absoluten Emanationsbestimmung mittels des aktiven Niederschlages, Kondensatormethode nach Frau Curie. Von K. W. F. Kohlrausch¹⁾, H. Dadourian²⁾, G. A. Blanc³⁾, K. Kurz⁴⁾, W. Wilson⁵⁾, V. F. Heß⁶⁾, Frau Curie⁷⁾, von Kinoshita, Nishigawa und Ono⁸⁾ sind theoretische Entwicklungen angegeben und auch praktische Messungen ausgeführt, zu dem Zwecke, aus der auf der Längeneinheit der inneren Belegung eines mit strömender oder ruhender Luft

1) K. W. F. Kohlrausch, Wien. Ber. 115, p. 1263, 1906; Phys. Zeitschr. 13, p. 1193, 1912.

2) H. Dadourian, Le Radium 5, p. 102, 1908.

3) G. A. Blanc, Phys. Zeitschr. 9, p. 294, 1908.

4) K. Kurz, Phys. Zeitschr. 9, p. 177, 1908.

5) W. Wilson, Phil. Mag. 17, p. 321, 1909.

6) V. F. Heß, Wien. Ber. 119, p. 147, 1910.

7) Mme. Curie, Die Radioaktivität, Bd. 2, p. 482, 1911.

8) Kinoshita, Nishigawa und Ono, Phil. Mag. 22, p. 821, 1911.

gefüllten Zylinderkondensators oder eines in freier Luft ausgespannten Drahtes niedergeschlagenen Menge aktiver Materie den Gehalt der Luft an den Zerfallprodukten der Radium- und Thoriumemanation zu berechnen, und weiterhin auch zu einer Bestimmung der Konzentration jener Emanationen selbst in der Atmosphäre zu gelangen. K. K u r z zieht auch die Aktiniumprodukte mit in den Bereich seiner Diskussion. Als Beispiel einer solchen theoretischen Überlegung möge die von Frau C u r i e durchgeführte dienen. Sie bezieht sich auf den stationären Zustand des radioaktiven Niederschlages auf einem Drahte, der mit negativer Ladung in der Achse eines zylindrischen abgeschlossenen Raumes ausgespannt ist. Hinsichtlich ihrer Zulässigkeit unterliegt zwar diese Betrachtungsweise wegen der diskreten Verteilung der Radiumemanation in der Luft (Abschn. 17), einigen Bedenken, dagegen bietet in diesem Falle die theoretische Behandlung den Vorteil der Geschlossenheit, leichter Übersichtlichkeit und verhältnismäßiger Einfachheit.

Es werde innerhalb eines mit Luft erfüllten geschlossenen Zylinderkondensators vor Anlegung der Potentialdifferenz radioaktives Gleichgewicht der Emanationen mit ihren ersten Zerfallprodukten angenommen, ein Zustand, der für die Radiumemanation leicht realisierbar ist. Ferner sollen nur die Produkte Radium *A* und Thorium *B* als positiv geladen — und zwar in ersterer Annäherung alle — und jede Art als von konstanter Beweglichkeit u vorausgesetzt werden. Erstere Annahme trifft nach H. W. S c h m i d t¹⁾ und K. K u r z²⁾ im wesentlichen zu, die zweite gilt, wie soeben (vgl. Abschn. 20) ausgeführt ist, im strengen Sinne für aus der freien Atmosphäre entnommene Luft jedenfalls nicht. Zwischen dem aktiven Niederschlage auf dem negativ geladenen axialen Drahte und den in der Luft suspendierten Teilchen bestehe ein stationärer Zustand, so daß ebensoviel von außen zuwandern, als von den bereits gesammelten durch radioaktiven Zerfall ausscheiden; für eine durch genügend lange Zeit (für Radium 5 Stunden) ausgedehnte Exposition des Drahtes wird diese Annahme erlaubt sein. Der Draht nimmt dann in einer Sekunde ebensoviel Atome von Radium *A* auf, als sich solche auf ihm in Radium *B* verwandeln, und wenn auch für dieses Produkt der stationäre Zustand erreicht ist, geht eine gleiche Menge von Radium *B* in Radium *C* über. Bis zu Radium *C* einschließlich soll dieser Zustand als bestehend angenommen, die Produkte der Thor-emanation sollen zunächst noch außer acht gelassen werden.

Wir bezeichnen mit N die als konstant vorausgesetzte Anzahl der im Kubikzentimeter der eingeschlossenen Luft vorhandenen Atome von

1) H. W. S c h m i d t, Ann. der Phys. 21, p. 609, 1906.

2) K. K u r z, l. c., p. 179.

Radiumemanation, mit N_1 die dem in demselben Volumen enthaltenen Atome von Radium A, λ und λ_1 seien die zugehörigen Zerfallskonstanten.

Dann würde für den Zustand des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Emanation und Radium A, den wir für die Luft voraussetzen, mit der wir den Zylinderkondensator anfüllen,

$$\lambda N = \lambda_1 N_1 \quad (\text{Abschn. 1})$$

sein. Der äußere Radius des Zylinders sei b , der des axial darin ausgespannten Drahtes a . Zwischen Achse und Zylindermantel bestehe die Potentialdifferenz V , und zwar sei, wie bemerkt, der Draht an den negativen Pol der ladenden Batterie angeschlossen. Dann ist die Feldstärke in der Entfernung r von der Zylinderachse

$$1) \quad f = -\frac{V}{r \lg \frac{b}{a}}.$$

Sobald das Feld angelegt ist, ändert sich die Konzentration des Radium A, während die der Emanation konstant bleibt. Die Beweglichkeit der Teilchen von Radium A in Luft sei u , so ist uf die Geschwindigkeit, die sie unter der Feldwirkung gegen die Achse hin annehmen. Ist auf dem Drahte der stationäre Zustand eingetreten, so ist die Anzahl der auf der Längeneinheit in einer Sekunde zerfallenden Atome von Radium A gleich der der in gleicher Zeit sich absetzenden und auch gleich der Zahl der zerfallenden Atome der beiden folgenden Umwandlungsprodukte Radium B und Radium C. Wir wollen diese Zahl mit φ bezeichnen und sie durch die schon eingeführten Größen ausdrücken.

Zu dem Zwecke berechnen wir die Anzahl der Radium-A-Atome, die durch zwei koaxiale Zylinderflächen von den Radien r und $r + dr$ und der Achsenlänge 1 in der Richtung gegen die Zylinderachse hindurchwandern. Für die erstere finden wir:

$$2 \pi r u f N_1,$$

für die zweite

$$2 \pi u \left(r f N_1 + \frac{d}{dr} (r f N_1) dr \right)$$

Die Differenz

$$2 \pi u \frac{d \cdot r f N_1}{dr} \cdot dr$$

stellt also den Betrag dar, um den die Zahl der Radium-A-Teilchen in der Zeiteinheit in dem von den beiden Zylinderflächen eingeschlossenen Raume infolge der Einwanderung durch die Feldwirkung zunimmt. Außerdem wächst die Zahl derselben Atome infolge des Zerfalls der im

gleichen Raume eingeschlossenen Emanation um den Betrag $2\pi r \cdot \lambda \cdot N dr$, nimmt aber infolge des Zerfalls des Radiums A in Radium B um $2\pi r \lambda_1 \cdot N_1 dr$ ab.

Danach muß, wenn der gleichförmige Zustand als erreicht angesehen wird, die Konzentrationszunahme für Radium A gleich Null, d. h.

$$2\pi u \frac{d \cdot r f N_1}{dr} dr + 2\pi r \lambda N dr - 2\pi r \lambda_1 N_1 dr = 0 \text{ sein.}$$

Aus Gleichung 2 entnehmen wir, daß

$$rf = \frac{V}{\lg \frac{b}{a}}$$

eine von r unabhängige Konstante ist. Nach Einsetzung in die vorige Formel resultiert also

$$2) \quad \frac{u V}{\lg \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d N_1}{dr} - \lambda_1 N_1 + \lambda N = 0,$$

in der nur N_1 von r abhängig ist. Setzt man zur Abkürzung:

$$m = \frac{2 u V}{\lg \frac{b}{a}},$$

so ergibt sich durch Integration:

$$N_1 = C e^{\frac{\lambda_1 r^2}{m}} + \frac{\lambda}{\lambda_1} N.$$

Zur Bestimmung der Konstanten C setze man $r = b$ und beachte, daß an der äußeren positiven Grenzfläche des Zylinders die Raumdichte der gleichnamig geladenen Radium- A -Partikeln gleich Null sein muß. Demnach folgt aus $r = b$ und $N_1 = 0$ die Bedingung:

$$C = -\frac{\lambda}{\lambda_1} N e^{-\frac{\lambda_1 b^2}{m}}, \text{ d. h.}$$

$$3) \quad N_1 = \frac{\lambda}{\lambda_1} N \left(1 - e^{-\frac{\lambda_1}{m} (b^2 - r^2)} \right)$$

In unmittelbarer Nähe des axialen Drahtes ($r = a$) ist die Raumdichte des Radiums A :

$$N_1 = \frac{\lambda}{\lambda_1} N \left(1 - e^{-\frac{\lambda_1}{m} (b^2 - a^2)} \right)$$

Demnach ist die Anzahl der Atome von Radium *A*, die in der Zeiteinheit auf der Längeneinheit des Drahtes sich absetzen, und bei dem vorausgesetzten stationären Zustand die der zugleich in dieser Zeit auf ihm zerfallenden

$$4) \quad \varphi = 2 \pi u a f N_1 = 2 \pi u \frac{V}{\lg \frac{b}{a}} \frac{\lambda}{\lambda_1} N \left(1 - e^{-\frac{\lambda_1 (b^2 - a^2) \lg \frac{b}{a}}{2 u V}} \right),$$

in welcher Formel *m* wieder durch den Ausdruck $\frac{2 u V}{\lg \frac{b}{a}}$ ersetzt, und für *f* nach Gleichung $1 \frac{V}{\lg \frac{b}{a}}$ geschrieben ist.

Durch diese Beziehung zwischen der Anzahl der in der Zeiteinheit auf der Längeneinheit des Drahtes sich absetzenden und zerfallenden Teilchen von Radium *A* wie auch *B* und *C* zu der Anzahl der Atome von Emanation in der Volumeneinheit der Luft und zu den übrigen angenommenen Konstanten ist die Aufgabe grundsätzlich gelöst. Da wir es mit einem abgeschlossenen Luftvolumen zu tun haben, wäre streng genommen noch der Zerfall der Emanation während der Versuchsdauer zu berücksichtigen. Für fünfstündige Dauer bliebe der hierdurch entstehende Fehler unter 4 Proz.

Will man zunächst beurteilen, welches der Wirkungsgrad unserer Sammelvorrichtung für Radium *A* ist, so muß man berechnen, wieviel von diesem Produkte innerhalb eines Stückes des zylindrischen Raumes von der Länge Eins in einer Sekunde gebildet wird. Die Zahl ist offenbar

$$\varphi_0 = \pi (b^2 - a^2) \lambda N,$$

daher ist das Verhältnis der Menge der auf dem Drahte gesammelten Radium-*A*-Teilchen zu der der überhaupt in derselben Zeit in dem Zylinder-raume gebildeten

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{2 u V}{(b^2 - a^2) \lambda_1 \lg \frac{b}{a}} \left(1 - e^{-\frac{\lambda_1 (b^2 - a^2) \lg \frac{b}{a}}{2 u V}} \right)$$

Man erkennt, daß dies Verhältnis nur von der Größe

$$\frac{(b^2 - a^2) \lambda_1 \cdot \lg \frac{b}{a}}{2 u V}$$

abhängt. Bezeichnet man diese mit *p*, so folgt

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{1 - e^{-p}}{p}.$$

Je kleiner p , um so näher kommt $\frac{1 - e^{-p}}{p}$ der Einheit, um so vollkommener wird das in der Luft gebildete Radium A durch das elektrische Feld auf der Innenelektrode niedergeschlagen. Man kann diesem Grenzfelde nahekomen, wie ohne weiteres ersichtlich, indem man b nahe gleich a , den Zylinder also sehr eng wählt, aber auch durch Vergrößerung der angelegten Spannung V . (Hierauf beruht die schon erwähnte Methode von E v e; vgl. Abschn. 19.)

Wir gehen nun auf die Gleichung 4' zurück, die die allgemeine Lösung des Problems enthält. φ , die Anzahl der auf der Längeneinheit des Drahtes in einer Sekunde zerfallenden Atome von Radium A , solange der Draht noch der Luft exponiert wird, ist einer experimentellen Bestimmung zugänglich. Man bringt zu dem Zwecke den Draht möglichst schnell nach Abschaltung der Ladespannung in eine Ionisierungskammer, deren Dimensionen die volle einseitige Ausnutzung der α -Strahlen des aktiven Beschlages ermöglichen, und bestimmt mit Hilfe des Sättigungsstromes die Anzahl Ionen, die von seiner Längeneinheit in einer Sekunde gebildet werden; wegen des Abfalls der Aktivität muß man, wenn diese Abnahme sich während der Messung bemerklich macht, den Anfangszustand durch Extrapolation der Abfallskurve bestimmen. Wir wollen die so gefundene Zahl mit I bezeichnen. Sie läßt sich durch φ ausdrücken, wenn man die bekannten Zahlen der Ionen einführt, die von einem α -Teilchen der Produkte Radium A und Radium C in Luft beim vollständigen Durchlaufen der Reichweiten gebildet werden. (Das β -strahlende Radium B vernachlässigen wir, seiner geringen ionisierenden Wirkung wegen.) Die Zahlen dieser Ionen seien n_1 für ein α -Teilchen vom Radium A , n_3 für ein solches von Radium C . Dann muß, da jedes Radium- A - und Radium- B -Teilchen bei seiner Umwandlung eine α -Partikel aussendet,

$$I = \varphi \frac{(n_1 + n_3)}{2}$$

sein. Der Nenner 2 ist hinzugefügt, da nur die eine Hälfte der ausgestrahlten α -Partikeln zur Ionisierung der Luft verwendet wird, die andere wird von dem Drahte selbst absorbiert. Daher ist

$$\varphi = \frac{2 I}{(n_1 + n_3)}.$$

Da somit φ bekannt ist, läßt sich mittelst der allgemeinen Lösungsformel 4 auch N , die Anzahl der Atome der Radiumemanation in der Volumeneinheit der im Zylinderkondensator abgeschlossenen Luft berechnen.

22. Drahtmethode in freier Luft. Nun ist der Emanationsgehalt der Atmosphäre so gering, daß man Zylinderkondensatoren von einigen

Kubikmetern Inhalt verwenden müßte, um auf der inneren Belegung (dem axial gespannten Drahte) eine Menge von Radium A zu sammeln, die bei normaler Empfindlichkeit des Elektrometers zur Unterhaltung eines gut meßbaren Sättigungsstroms in einer Ionisierungskammer ausreichen würde. Die praktische Anwendung der im vorigen rechnerisch behandelten Methode wird daher sehr erschwert, wenigstens wenn Messungen an beliebigen Orten verlangt werden. Immerhin würde es eine lohnende Aufgabe sein, an einem Zylinderkondensator von bekannten Dimensionen, der mit Luft von ebenfalls genau bekanntem Emanationsgehalt gefüllt ist, das theoretische Ergebnis zu prüfen.

Messungen an beliebigen Orten sind nur mit leicht transportablen Apparaten bequem ausführbar. Es sind zwei verschiedene Verfahren ausgebildet, durch die sich aktive Niederschläge von größerer Strahlungsintensität auf Drähten sammeln lassen.

Bei der ersteren wird ein negativ geladener Draht ganz frei ausgespannt ¹⁾, bei der zweiten bildet er wiederum die Achse eines geerdeten Zylinderkondensators, in dem aber die Luft nicht ruht, sondern mit bekannter Geschwindigkeit in der Achsenrichtung hindurchgetrieben wird. ²⁾

Die erste Methode stellt die geringsten Anforderungen an experimentellem Aufwande, sie ist daher an den verschiedensten Orten der Erde benutzt.

Vernachlässigt man das natürliche Feld der Erde und macht man die Annahme, daß in der Nähe des Drahtes radioaktives Gleichgewicht zwischen der Emanation und ihrem ersten Produkte auch nach Anlegung der negativen Spannung bestehen bleibt, so darf man dauernd $N_1 = \frac{N\lambda}{\lambda_1}$ setzen. ³⁾ Dann ist, nach Erreichung des stationären Zustandes auf dem Drahte (also für Radiumemanation nach mehreren Stunden), die in der Zeiteinheit auf der Längeneinheit sich absetzende und zugleich auch die zerfallende Anzahl Atome von Radium A:

$$\varphi = 2\pi a u f \frac{\lambda}{\lambda_1} N,$$

1) Die Methode ist ursprünglich von J. Elster und H. Geitel angegeben. Eine eingehende theoretische Untersuchung findet sich bei Kinoshita, Nishigawa und Ono (l. c.).

2) Methode von H. Gerdien, K. W. F. Kohlrausch, K. Kurz, V. F. Heß (l. c.).

3) Diese Annahme ist übrigens selbst dann nicht streng richtig, wenn auch der Draht im elektrostatischen Schutze etwa von Bäumen oder Gebäuden ausgespannt ist, da allgemein das Gleichgewicht zwischen der Ra-Emanation und dem Ra-A durch das Erdfeld zu Ungunsten des letzteren Stoffes verschoben wird. (Vergl. über diese Frage J. Salpeter (l. c., Abschn. 18) u. W. F. G. Swann, Terr. Magnetism and Atmosph. Electricity 19, p. 23, 1914.)

wenn f wieder die Feldstärke an der Oberfläche des Drahtes bezeichnet, a ist wie oben sein Radius.

Ist der Draht so hoch über dem Erdboden ausgespannt, daß seine Dicke klein gegen diese Höhe (δ) ist, so läßt sich ¹⁾ der Mittelwert der Feldstärke f an seiner Oberfläche durch $\frac{V}{a \lg \frac{2\delta}{a}}$ ersetzen, wenn V das

an den Draht gelegte Potential gegen die Erde bedeutet, man hat alsdann angenähert

$$\varphi = 2 \pi u \frac{V}{\lg \frac{2\delta}{a}} \frac{\lambda}{\lambda_1} N.$$

Dieselbe Formel ließe sich auch auf Bestimmungen der atmosphärischen Radioaktivität vom Ballon aus anwenden. Zwei gleich lange Drähte vom Radius a werden isoliert im Abstände 2δ vom Korbe aus parallel ausgehängt und auf der Potentialdifferenz V erhalten, eine Methode die zuerst von H. Fleming (Abschn. 16) verwendet ist. Nach zweibis dreistündiger Exposition wird der Draht vom negativen Pol hereingeholt, und die Bestimmung von φ mittelst des Sättigungsstroms würde alsdann zur Berechnung von N führen.

23. Verhältnis der Konzentrationen der Thor- und Radiumemanation in der Atmosphäre. Ein weiteres Interesse bieten diese theoretischen Ausführungen noch deshalb, weil sie unter der allerdings sehr angreifbaren Annahme, daß auch für die Thorprodukte radioaktives Gleichgewicht mit der Thoremanation in der Atmosphäre bestände, das Verhältnis der Konzentrationen der Thoremanation zu der des Radiums berechnen lassen würden ²⁾:

Wir beschränken uns dabei auf die für die freie Exposition eines Drahtes angegebene Formel, und nehmen an, daß die Dauer dieser Exposition mehrere Tage betragen habe, so daß der stationäre Zustand auch für die auf dem Drahte angesammelten Thorprodukte vorausgesetzt werden darf. Wenden wir auf die Thoremanation und ihre Produkte die gestrichenen Bezeichnungen an, so wäre (vgl. Abschn. 22)

$$\varphi' = 2 \pi a u' f \frac{\lambda'}{\lambda_1} N'.$$

φ' , die Anzahl der Atome von Thorium B , die im Gleichgewichtszustande auf der Längeneinheit des Drahtes zerfallen, läßt sich jetzt

1) Vgl. E. Mascart, Handbuch der statischen Elektrizität. Deutsche Bearbeitung von Wallentin. Bd. 1, p. 383, 1885.

2) Frau Curie, Die Radioaktivität. Bd. 2, p. 493.

nach der oben (Abschn. 10) angegebenen Methode, die Radiumaktivität von der Thoraktivität zu trennen, ebenfalls bestimmen. Angenommen, es würden I' -Ionen in der Sekunde von der Drahtlänge 1 durch die Thorprodukte allein erzeugt, wobei als α -Strahler nur Thorium C_1 und Thorium C_2 in Betracht gezogen werden, so wäre, analog wie oben:

$$I' = \varphi' \frac{(n'_2 + n'_3)}{2},$$

wenn n'_2 und n'_3 die Anzahl der von je einem α -Teilchen von Thorium C_1 und Thorium C_2 erzeugten Ionen bezeichnen. Dann ist das Verhältnis der Zahl der Atome von Thoremanation zu der des Radiums in der Volumeneinheit Luft:

$$\frac{N'}{N} = \frac{\lambda \lambda'_1}{\lambda_1 \lambda'} \frac{u}{u'} \frac{\varphi'}{\varphi}, \text{ oder}$$

$$\frac{N'}{N} = \frac{I'}{I} \frac{n_1 + n_3}{n'_2 + n'_3} \frac{u}{u'} \frac{\lambda \lambda'_1}{\lambda_1 \lambda'}.$$

Für u und u' , die Beweglichkeiten der Partikeln von Radium A und Thorium B in der freien Atmosphäre sind nun bestimmte Zahlen überhaupt nicht angebar. Eine naheliegende Vereinfachung besteht in der Annahme $u = u'$. Nach K u r z ¹⁾ trifft dies aber sicher nicht zu, vielmehr sind die Radiumprodukte im Durchschnitt etwa dreimal so beweglich wie die des Thoriums. Wird die Annahme gleicher Beweglichkeit trotzdem aufrecht erhalten, so könnte man, da alle übrigen Zahlenwerte der Formel bekannt sind, das Verhältnis der Mengen (d. h. der Atomzahlen im ccm) der Thoremanation zu der des Radiums in der freien Atmosphäre berechnen. Es ergaben sich aus Beobachtungen von Blanc, Dadourian und Wilson für Rom, New Haven und Manchester die Zahlen $1/20\,000$ — $1/30\,000$, $1/30\,000$ — $1/50\,000$ und $1/3700$. Kinoshita, Nishigawa und Ono fanden nach einem andern Rechnungsverfahren für Tokio in verschiedenen Höhen über dem Erdboden (1,5—6,5 m) Zahlen zwischen $1/6500$ — $1/13\,000$. Da Radium- sowohl wie Thoriumemanation an verschiedenen Orten der Erde je nach der Bodenbeschaffenheit in ungleichen Mengen von der Flächeneinheit des Erdbodens ausgeatmet werden, so ist ohne weiteres ersichtlich, selbst wenn wir von der Unzulässigkeit einiger Annahmen, von Fehlerquellen und unberechenbaren Nebenumständen ganz absehen, daß das Verhältnis der Konzentrationen der beiden Emanationen in der Atmosphäre nicht konstant gefunden werden kann.

24. Methode der Aspiration. Auf gesicherterer Grundlage, wie die Methode der Freixposition, beruht die Aspirationsmethode, bei der die

1) K. K u r z, Habilitationsschrift, München, Technische Hochschule, p. 34, 1909.

zu untersuchende Luft in konstantem Strome zwischen den entgegengesetzt geladenen Belegungen eines Zylinderkondensators hindurchgesaugt wird. Bei genügend hoher Potentialdifferenz und langem Wege der strömenden Luft werden nur die stärkst beschwerten und die elektrisch neutralen Teilchen von Radium *A* und Thorium *B* dem Abgefangenwerden entgehen. Die Zeit des Durchströmens sowie die Menge der im ganzen geförderten Luft muß bekannt sein, ersteres ist erforderlich, um den jeweiligen Betrag der α -Strahlung des auf der einen Kondensatorbelegung gebildeten Niederschlages vermittelst der Abfallskonstanten der einzelnen Produkte auszudrücken. Nach Unterbrechung des Luftstroms kann derselbe Kondensator als Ionisierungskammer zur Bestimmung der Intensität der α -Strahlung des aufgefangenen aktiven Niederschlages dienen, oder es ist der die innere Belegung bildende axiale Draht sofort in eine empfindliche strommessende Vorrichtung einzuführen.¹⁾

Eine so lang dauernde Ausdehnung des Versuches, daß ein stationärer Zustand des aktiven Betrages vorausgesetzt werden dürfte, ist aus praktischen Gründen (Schwierigkeit der Erhaltung eines konstanten Luftstroms) schon für das Radium untunlich und für das Thorium um so mehr ausgeschlossen. Die Einführung einer endlichen Expositionsdauer in die Rechnung bringt die Anwendung der für die einzelnen Produkte charakteristischen Exponentialfunktionen mit sich und macht die Formeln etwas umfangreich. In betreff dieser Entwicklungen selbst sei auf die angeführten Arbeiten von K. W. F. Kohlrausch, K. Kurz, V. F. Hess verwiesen, von den Ergebnissen machen wir im folgenden Gebrauch, indem wir uns auf die Radiumprodukte beschränken.

Bezeichnet man mit ε den Sättigungsstrom in statischen Einheiten, den die in einem Kubikzentimeter der freien atmosphärischen Luft enthaltene Menge von Radium *A* unterhält, mit C die in Zentimetern gemessene Kapazität des Kondensators einschließlich des Elektrometers, mit Φ das pro Sekunde durch den Kondensator hindurch geförderte Luftvolumen in Kubikzentimetern, mit dV die pro Sekunde am Elektrometer beobachtete Spannungsabnahme, gemessen in elektrostatischen Einheiten des Potentials, so ist $\varepsilon = K \frac{C dV}{\Phi}$.

K ist ein Zahlenfaktor, der nur von der Dauer der Exposition, d. h. von der Zeit abhängt, während welcher die Luft durch den Kondensator gestrichen ist, er kann mittels der Abfallkonstanten von Radium *A*, Radium *B*, Radium *C* und der oben eingeführten Ionenzahlen n_1 und n_3 für

1) E. Schrödinger, Wien. Ber. 1222, p. 2024, 1913.

jeden Wert dieser Zeit berechnet werden. K. W. F. K o h l r a u s c h ¹⁾ gibt eine Tabelle für K bis zur Expositionsdauer von 5 Stunden.

Legt man als annehmbaren Mittelwert aus Beobachtungen von K o h l r a u s c h und K u r z die Zahl $\varepsilon = 15 \cdot 10^{-11}$ E. E. zugrunde, so läßt sich die in einem Kubikzentimeter atmosphärischer Luft enthaltene Menge an Radiumemanation in Curies ausdrücken. Zuvor ist nach einer von J. S a l p e t e r ²⁾ gegebenen Begründung an jenem Zahlenwerte noch eine Korrektur anzubringen. Da nämlich, wie schon oben erwähnt, ein Teil der Radium A-Partikeln durch Anlagerung negativer Ionen neutralisiert wird, so ist der durch den Kondensator abgefangene Betrag von Radium A zu klein. Der erforderliche Korrekturfaktor ist von K o h l r a u s c h zu 1,55 berechnet, so daß sich der Zahlenwert von ε auf $23 \cdot 10^{-11}$ E. E. erhöhen würde. Die im Kubikzentimeter Luft suspendierte Menge von Radium A würde für sich allein einen Sättigungsstrom dieses Betrages unterhalten. Der zugehörigen Gleichgewichtsmenge (also bei Vernachlässigung des störenden Einflusses des Erdfeldes (Abschn. 22)) an Emanation entspräche, infolge der etwas geringeren ionisierenden Kraft ihrer α -Strahlen, ein Sättigungsstrom von $21,4 \cdot 10^{-11}$ E. E. Somit beträgt diese Gleichgewichtsmenge selbst $80 \cdot 10^{-18}$ Curies. Dies Ergebnis ist in vorzüglicher Übereinstimmung mit dem der direkten Emanationsmessungen in der Atmosphäre mittels des Absorptionsverfahrens (Abschn. 17).

So erfreulich der Einklang der Ergebnisse der beiden grundsätzlich verschiedenen Methoden genannt werden muß, so darf doch darauf hingewiesen werden, daß bei der ungleichförmigen Verteilung der Emanationsquellen auf der Erde der Emanationsgehalt der Luft an weit entfernten Orten, zu verschiedenen Zeiten und unter wechselnden meteorologischen Bedingungen auch im Mittel schwerlich von nahe gleicher Größe sein kann. In der Tat fand E. S c h r ö d i n g e r (l. c., p. 2052) später am gleichen Orte wie K o h l r a u s c h nur etwa den fünften Teil des Gehaltes der Luft an Ra-A. Simultanbeobachtungen an einem bestimmten Orte nach den beiden Verfahren sind daher noch notwendig, um die von K o h l r a u s c h hervorgehobene Übereinstimmung der Absorptions- und Aspirationsmethode völlig sicherzustellen.

Vielleicht würde es sich zur Vereinfachung des Verfahrens verlohnen, auf einen älteren Vorschlag von A. S e l l a ³⁾ zurückzugreifen, nach dem die in einem gemessenen Luftraume vorhandenen radioaktiven Träger unabhängig von der Art ihrer Eigenladung und ihrer Beweglichkeit zugleich

1) K. W. F. K o h l r a u s c h, Phys. Zeitschr. 13, p. 1193, 1912. (Bei den Zahlenwerten von K ist der Faktor 10^{-3} zu ergänzen.)

2) J. S a l p e t e r, Wien. Ber. 119, p. 108, 1910.

3) A. S e l l a, Rend. Acc. dei Lincei, 11, 2. Sem., p. 81, 1902.

mit allen übrigen suspendierten Teilchen durch elektrische Spitzenentladung auf einer Metallfläche niedergeschlagen werden sollten. Die Methode hat den Vorzug, eine Reihe von Fehlerquellen von vornherein auszuschalten, ihre bei kleinem Luftvolumen geringe Empfindlichkeit könnte durch Anwendung von Elektrometern ausgeglichen werden, die, wie es jetzt von verschiedenen Seiten erreicht ist, hohe Empfindlichkeit mit kleiner Kapazität vereinigen.

25. Schätzung des Emanationsgehalts der Luft mittels der „Aktivierungszahl“. Verzichtet man auf die Gewinnung von Absolutwerten und wählt die Beobachtungstage so aus, daß man auf eine durchschnittlich übereinstimmende Beweglichkeit der aktiven Träger rechnen kann (schließt also Niederschlagstage und solche mit stark getrüübter Atmosphäre aus), so wird man auf die einfache Methode der Freixposition an einem elektrostatisch geschützten Orte zurückgreifen. Man kann dann nach Exposition eines Drahtes in freier Luft, bei einem Potential von —2000 Volt gegen die Erde und zwei- bis dreistündiger Dauer, den durch die Längeneinheit des Drahtes in einer Ionisierungskammer unterhaltenen Sättigungsstrom in grober Annäherung der Konzentration der Radiumemanation in der Atmosphäre proportional setzen. Für bestimmte Abmessungen der Ionisierungskammer und unveränderliche Kapazität des elektrometrischen Systems gelangt man so zu einer willkürlichen Einheit (der Aktivierungszahl A), die von J. Elster und H. Geitel¹⁾ vorgeschlagen ist, und in der zahlreiche Messungen über die ganze Erde ausgeführt sind. Zu orientierenden Versuchen, auch auf Forschungsreisen, wird diese erste Methode ihrer Einfachheit wegen wahrscheinlich von Wert bleiben. Auf jeden Fall gibt sie ein Maß für die Menge aktiver Materie die bei konstantem elektrischen Felde der Erde auf ihrer Oberfläche niedergeschlagen würde.

Es möge darauf hingewiesen werden, daß unsere fundamentalen Kenntnisse über die Emanationsverteilung in der Atmosphäre, die Anhäufung über den Kontinenten, besonders in den Gebirgstälern, ihre geringe Dichtigkeit über den Ozeanen, ihr Vordringen in große Höhen, sämtlich durch diese einfache Methode gewonnen sind²⁾. Es wird schwer sein, sie durch eine von gleicher Bequemlichkeit zu ersetzen, vielleicht ließe

1) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 4, p. 522, 1903.

2) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 4, p. 522, 1903; G. C. Simpson, Phil. Trans. Roy. Soc. London (A) 205, p. 61, 1905; G. C. Simpson und J. R. Wright, Proc. Roy. Soc. A. 85, p. 175, 1911; W. Knoche, Observaciones en la Mina Aquila, p. 243, Santiago de Chile, 1911; W. Knoche, Phys. Zeitschr. 13, p. 1221, 1912; A. Gockel, Phys. Zeitschr. 8, p. 701, 1907.

sich die Zuverlässigkeit dadurch erhöhen, daß man eine Art von Eichverfahren benutzte, d. h. empirisch feststellte, welchen Sättigungsstrom die Längeneinheit eines Drahtes unterhält, der eine festgesetzte Zeit (etwa 3 Stunden) bei bestimmter Ladespannung (—2000 Volt) einem sehr großen Luftraum (etwa Zylinder von 2 m Radius und Axenlänge) ausgesetzt war, der eine bekannte Konzentration an Radiumemanation enthielt; die gleichen Bedingungen für die Ladespannung und die Dauer wären auch bei der Freixposition einzuhalten.

Der allein durch das Erdfeld an der Oberfläche hervorragender Leiter gebildete aktive Niederschlag läßt sich leicht nachweisen¹⁾. Überall, wo große Aktivierungszahlen zugleich mit starker Intensität des Erdfeldes beobachtet werden, muß sich daher eine kräftig ionisierte Luftschicht in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche bilden. Es trifft dies nachgewiesenermaßen für Bergspitzen zu, um die sich dann, wiederum infolge des Erdfeldes, vorzugsweise die positiven Ionen der Luft ansammeln. Diese an positiven Ionen reiche Lufthülle der Gipfel eines Hochgebirges kann wahrscheinlich zu disruptiven elektrischen Entladungen Anlaß geben, wie sie tatsächlich bei heiterem Himmel regelmäßig in der Kordillere von Chile bei Nacht beobachtet werden; auch in den Alpen kommen sie, wenn auch sehr selten, vor²⁾.

26. Radioaktivität der Niederschläge. Da die Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes an schwebenden Staubteilchen erfolgt, und zu diesen auch die Träger der Umwandlungsprodukte der Emanation gehören, so ist erklärlich, daß die Niederschläge selbst eine vorübergehende Radioaktivität zeigen³⁾. In verstärkendem Sinne mag dabei die Eigenelektrizität der Niederschlagsteilchen gewirkt haben, wenn sie, wie häufig der Fall, von negativem Vorzeichen war. Man weist diese Radioaktivität am sichersten an den äußerst geringen Rückständen nach, die beim schnellen Verdampfen von Regen- oder Schneewasser in einer Schale zurückbleiben. Auch am Reif und Tau ist eine vorübergehende Aktivität nachweisbar, sie stammt teils aus dem Erdboden, teils aus der Atmosphäre.

1) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zeitschr. 3, p. 79, 1901; W. Saake, Phys. Zeitschr. 4, p. 626, 1903; H. Bongards, Met. Zeitschr. 31, p. 189, 1914.

2) W. Knoche, Meteor. Zeitschr. 29, p. 87 u. p. 329, 1912; J. Rojacher, Meteor. Zeitschr. 5, p. 202, 1888.

3) C. T. R. Wilson, Proc. Cambr. Phil. Soc. 11, p. 428, 1902; p. J. Allen, Phys. Rev. 16, p. 106, 1903; J. C. Mc Lennan, Phys. Rev. 16, p. 184, 1903; J. Jaumann, Met. Zeitschr. 22, p. 102, 1905; G. Costanzo und C. Negro, Phys. Zeitschr. 7, p. 350, 1906; K. Bergwitz, Jahrb. der Radioaktivität und Elektronik 6, p. 11, 1910; W. Budig, Ber. des Kgl. Preuß. Meteorol. Instituts, Nr. 224, p. 179—184, 1911.

Nach Frau Curie¹⁾ bewirkt ein Zusatz von Radiumemanation zu wasserdampfhaltiger Luft, auch wenn die Sättigungsmenge nicht erreicht ist, eine Nebelbildung; es ist aber bei der äußerst geringen Konzentration der Radiumemanation in der Atmosphäre kaum anzunehmen, daß dieser (auf chemischen Veränderungen der Luft beruhende) Vorgang bei der Wolkenbildung Bedeutung hat.

27. Radioaktivität der Luft und atmosphärische Elektrizität. Der Wert der Untersuchungen über die atmosphärische Radioaktivität liegt z. T. in ihrer nahen Beziehung zur Luftelektrizität, daher sind sie meist von diesem Gesichtspunkte aus unternommen und mit Rücksicht auf dieses Ziel zu beurteilen. Eine ausführliche Darstellung der in Betracht kommenden Fragen würde über die Grenzen des hier zu behandelnden Gebietes hinausführen; man findet Aufschluß darüber in den neueren Werken über Luftelektrizität²⁾. Wir erwähnen nur den von Elster und Geitel³⁾ ausgesprochenen Gedanken, daß das elektrostatische Feld der Erde eine Folge der Adsorption negativer Ionen aus der Atmosphäre durch den Erdkörper sei, sowie die Weiterbildung dieser Vorstellung durch H. Ebert⁴⁾, der jene Ionenadsorption in die Kapillaren des Erdreiches und die sie erfüllende emanationsreiche Bodenluft verlegte. Ob es möglich sein wird, das elektrische Feld der Erde quantitativ auf Vorgänge solcher Art zurückzuführen, ist indessen zweifelhaft geworden⁵⁾. Von besonderer Bedeutung für die Frage nach der Ursache des Erdfeldes ist die Entscheidung darüber, ob wirklich, wie aus den luftelektrischen Beobachtungen in der Antarktis hervorzugehen scheint, seine jährliche Periode für die Nord- und Südhalbkugel zusammenfällt⁶⁾. Vorderhand widerspricht allerdings diese Annahme noch dem von Berndt in Argentinien konstatierten Verhalten⁷⁾.

28. Die γ -Strahlung des Erdkörpers. Die Radioaktivität des Erdkörpers beeinflußt außer durch die Zufuhr an Emanationen noch durch

1) M me Curie, Comptes Rendus 145, p. 1145, 1907; 147, p. 379, 1908.

2) H. Mache und E. v. Schweidler, Die atmosphärische Elektrizität, Braunschweig 1909; A. Gockel, Die Luftelektrizität, Leipzig 1908; K. Kähler, Luftelektrizität, Sammlung Göschel, 1913.

3) J. Elster und H. Geitel, Terr. Magnetism and Atmosph. Electricity 4, p. 223, 1899.

4) H. Ebert, Phys. Zeitschr. 5, p. 135 u. 499, 1904; 6, p. 825 u. 828, 1905.

5) G. C. Simpson, Phys. Zeitschr. 5, p. 325 und 734, 1904; ferner J. Schünemann, Phys. Zeitschr. 12, p. 64, 1911.

6) J. Harnn, Meteor. Zeitschr. 31, p. 66, 1914.

7) G. Berndt, Phys. Zeitschr. 13, p. 820, 1912.

eine direkte Strahlung die Atmosphäre, die im wesentlichen nichts anderes als die γ - und in unmittelbarer Nähe des Bodens auch der durchdringendste Anteil der β -Strahlung der in der Erde enthaltenen radioaktiven Massen ist. Ihr Nachweis und ihre quantitative Bestimmung geschieht in Anlehnung an ein schon von ihrem Entdecker C o o k ¹⁾ herrührendes Verfahren.

In einer allseitig geschlossenen metallenen Ionisierungskammer wird der von der spontanen Leitfähigkeit der Luft unterhaltene Sättigungsstrom gemessen ²⁾. Nach Einschließung des Apparats in eine Hülle aus Bleiblech vermindert sich die Intensität jenes Stromes, ein Zeichen davon, daß er zum Teil durch eine absorbierbare von außen kommende Strahlung unterhalten wird. Bei fortschreitender Verstärkung des Bleimantels nähert sich der Strom einem bestimmten Grenzwerte, zieht man diesen Betrag von dem ursprünglich beobachteten ab, so erhält man unter der Annahme, daß von dem Bleimantel keine primäre oder sekundäre γ -Strahlung ausgeht, den Teil der Wirkung, der von der äußern Strahlung her stammt, soweit diese überhaupt in die Ionisierungskammer eindrang. Der verbleibende Rest ist wahrscheinlich auf Spuren radioaktiver Materie in den Wänden der Ionisierungskammer und der eingeschlossenen Luft zurückzuführen. Setzt man voraus, daß jene abschirmbare Strahlung allein dem in der Erde enthaltenen R a d i u m zuzuschreiben ist, so läßt sich der Apparat mittelst eines Radiumpräparats von bekannter Zusammensetzung in gemessenem Abstände geradezu eichen, und man kann unter Zugrundelegung des Absorptionskoeffizienten der Erds substanz für die γ -Strahlen des Radiums die Radiummenge berechnen, die in der Volumeneinheit der Erde am Beobachtungsorte vorhanden sein müßte, um die wirklich beobachtete durchdringende Strahlung zu bewirken. Die auf diese Weise von E v e ³⁾ ausgeführten ersten Berechnungen gaben für Montreal in Kanada einen Radiumgehalt des Erdbodens, der mit dem von J o l y und S t r u t t für die häufigsten Gesteine gefundenen (Abschn. 4) von etwa derselben Größenordnung ist. An Stelle des Bleimantels können als Schirme für die durchdringenden Strahlen mit Vorteil andere radiumfreie Materialien verwendet werden, die uns die Natur in dicken Schichten zur Verfügung stellt, wie reines Wasser, Steinsalz, Kalkgestein und anderes; hierauf

1) L. C o o k, Phil. Mag. 6, p. 403, 1903.

2) C. J. W r i g h t, Phil. Mag. 17, p. 310, 1909; J. G. M c L e n n a n und E. B u r t o n, Phil. Mag. 5, p. 707, 1903; Th. W u l f, Phys. Zeitschr. 10, p. 1, 1909; A. G o c k e l, Phys. Zeitschr. 9, p. 907, 1908; G. A. C l i n e, Phys. Rev. 30, p. 35, 1910; J. C. M c L e n n a n und E. N. M a c a l l u m, Phil. Mag. 22, p. 639, 1911; D. P a c i n i, Le Radium 8, p. 307, 1911.

3) S. A. E v e, Phil. Mag. 12, p. 194, 1906.

beruht die Abnahme der durchdringenden Strahlung über Wasserflächen und in den künstlichen oder natürlichen Höhlen aus derartigem Material. Will man aus dem gemessenen Betrage der durchdringenden Strahlung die Zahl der Ionen bestimmen, die durch sie in der freien Atmosphäre pro Sekunde entstehen, so hat man zu beachten, daß jede γ -Strahlung an der Wand der Ionisierungskammer sekundäre β -Strahlen erregt, deren ionisierende Wirkung sich zu der der ersten addiert. Am geringsten ist dieser Effekt, wenn das Material der Wände aus Zink oder Aluminium besteht.

Es ist keine einfache Aufgabe, diese sekundäre Ionisierung von der in der freien Gasmasse auftretenden zu trennen, ist doch auch die letztere im Grunde genommen einer β -Strahlung zuzuschreiben, die beim Zusammentreffen der γ -Strahlen mit den einzelnen Gasmolekülen selbst erregt wird. Von Eve, Moseley und Robinson ist für die γ -Strahlung des Radiums (d. h. Radium C) die Konstante ermittelt worden, die die Anzahl der im Kubikzentimeter freier Luft von 1 Gramm Radium in 1 cm Abstand pro Sekunde erzeugten Ionen angibt ($3,9 \cdot 10^9$). Mißt man nun den Sättigungsstrom in einer Zinkkammer, der von der γ -Strahlung eines Radiumpräparats von bekanntem Gehalte in bestimmtem Abstände unterhalten wird, so kann man danach denjenigen Bruchteil des Stromes ermitteln, der von der an den Wänden erregten Sekundärstrahlung erzeugt wird. Ist nun ferner durch Abschirmen derselben Ionisierungskammer gegen die Erdstrahlung der Betrag des von der letzteren unterhaltenen Sättigungsstromes bekannt, so kennt man auch für diesen — vorausgesetzt, daß jene Strahlung gleichfalls von γ -Strahlen des Radium C herrührt — den Anteil der sekundären Strahlen, die an den Wänden erregt werden. Man findet auf diese Weise etwa zwei bis drei Ionen, die allein von dieser γ -Strahlung einige Meter über dem Erdboden pro Sekunde und Kubikzentimeter in der Luft gebildet werden.

Es bedarf keines besonderen Hinweises, daß die Intensität dieser überall verbreiteten Strahlung örtlich starke Verschiedenheiten zeigen muß. In der Tat ist sie, wie schon bemerkt, wesentlich geringer über Wasserflächen als über dem Lande, ein einfacher Beweis, daß sie der Hauptsache nach aus der Erde stammen muß, teilweise tragen aber ohne Zweifel auch die radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre dazu bei.

Legt man die wirklich gemessenen Werte für den durchschnittlichen Gehalt der Atmosphäre an Radiumemanation (Abschn. 17) wie für den des Erdbodens an Radium und Thorium zugrunde (Abschn. 4—6), so würde die γ -Strahlung der in der Atmosphäre enthaltenen aktiven Produkte nur 0,1 bis 0,2 Ionen für die Raum- und Zeiteinheit beitragen, während die vom Boden ausgehende in seiner unmittelbaren Nähe vier bis fünf liefern würde. Es läßt sich nun theoretisch berechnen, wie diese beiden

Komponenten der durchdringenden Strahlung, die vom Boden und die von der Atmosphäre herrührende, sich ändern werden, wenn man die Ionisierungskammer in verschiedene Höhen über der Erdoberfläche bringt.

Wie von K u r z ¹⁾, von E v e ²⁾ und später von K i n g ³⁾ durch ausführliche Rechnung gezeigt ist, müßte der vom Erdboden allein herrührende Anteil der durchdringenden Strahlung mit der Höhe in der Art abnehmen, daß schon in 300 m Erhebung über der Erdoberfläche seine Intensität praktisch gleich Null gesetzt werden könnte. Denkt man sich die radium-führende Schicht an und unter der Erdoberfläche von veränderlicher Dicke, so ergibt die Rechnung, das von etwa 11 cm Dicke an eine weitere Verstärkung dieser Schicht keinen Einfluß mehr auf die Abnahme der Strahlung mit der Höhe ausüben würde. Aus einer größeren Tiefe als höchstens 1 m würde ohnehin wegen der Absorption der Strahlen im Boden keine merkliche Intensität mehr nach außen dringen.

S c h r o e d i n g e r ⁴⁾ berechnet den von der A t m o s p h ä r e allein herrührenden Anteil der Strahlung unter der Annahme, daß der Gehalt an strahlender Substanz in der Luft der Dichtigkeit der letzteren proportional sei, und daß durch die Zirkulation der Atmosphäre durch jedes horizontale Flächenstück gleichviel an strahlender Materie auf- und abgeführt werde. Dann würde die von der Luft ausgehende Strahlung innerhalb der ersten 1000 m auf das Doppelte des Betrages am Erdboden zunehmen, um von da an langsam wieder kleiner zu werden. Dürfte man beispielsweise die von dem Erdboden ausgehende γ -Strahlung der der Atmosphäre an der Erdoberfläche gleichsetzen, so käme für die ersten 1000 m Erhebung eine wesentliche Konstanz der Gesamtstrahlung heraus. Diese Gleichsetzung ist aber für eine normale Bodenbeschaffenheit nach den Messungen von E v e , M c L e n n a n und M c L e o d ⁵⁾ nicht erlaubt, man wird vielmehr, da die Erdstrahlung bei weitem überwiegt, eine jähe Abnahme der Strahlung mit der Höhe erwarten müssen. Die Beobachtungen im Ballon, die für die Entscheidung allein in Betracht kommen können, haben bis jetzt zu übereinstimmenden Ergebnissen nicht geführt. K. B e r g w i t z ⁶⁾ fand eine Abnahme der Strahlung mit der Höhe bis auf $\frac{1}{4}$ des am Erdboden gemessenen Betrages bei etwa 1300 m, A. G o c k e l und

1) K. K u r z , Verh. der Deutschen Phys. Ges. 11, p. 636, 1909.

2) S. A. E v e , Phil. Mag. 21, p. 34, 1911.

3) L. V. K i n g , Phil. Mag. 23, p. 242, 1912, und Phil. Mag. 26, p. 604, 1913.

4) E. S c h r o e d i n g e r , Wien Ber. 121, Abt. IIa, p. 2391, 1912.

5) S. A. E v e , Phil. Mag. 21, p. 33, 1911. M c L e n n a n und M c L e o d , Phil. Mag. 26, p. 750, 1913.

6) K. B e r g w i t z Habilitationsschrift p. 38, Braunschweig 1910.

C. V. Heß¹⁾ konnten eine solche Abnahme nicht feststellen, letzterer fand dagegen von etwa 4000 m an eine erhebliche Zunahme. W. Kohlhörster²⁾ bestätigte sowohl die anfängliche Abnahme wie die bei 2000—3000 m einsetzende Zunahme der Strahlung. Weitere Untersuchungen dieser Erscheinung sind daher notwendig.

Man darf nicht vergessen, daß die Messung der durchdringenden Strahlung in der Atmosphäre wegen ihrer äußerst geringen Intensität zu den Aufgaben gehört, die an den elektrometrischen Apparat die allerhöchsten Anforderungen hinsichtlich seiner Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen, besonders der Temperatur und dem Luftdrucke stellen. Je größer das als Ionisierungskammer verwandte Luftvolumen, um so mehr wird der gesuchte Effekt wahrscheinlich diese Störungen überwiegen. Von dieser Erwägung aus dürfte die von Bergwitz angewandte Methode, der mit großem Luftvolumen (ca. 120 Litern) arbeitete, besonderes Zutrauen verdienen.

Die Entscheidung darüber, ob die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre mit der Höhe dauernd abnimmt oder in größeren Höhen wiederum anwächst, ist von hervorragendem Interesse. Würde doch der letztere Befund entweder auf eine von den bekannten Radioelementen und ihren Produkten unabhängige γ -Strahlung in der Atmosphäre³⁾ oder selbst auf eine kosmische Strahlungsquelle hinweisen. Die Existenz der letzteren ist zwar an sich nicht unwahrscheinlich, doch ist zu bedenken, daß in den größten Höhen, aus denen Messungen vorliegen, solche von außen kommende γ -Strahlen immer noch eine atmosphärische Schicht durchlaufen haben müßten, die einem Quecksilberschirme von 30 bis 40 cm äquivalent ist; ihre Intensität im freien Weltraume oder auch ihre Durchdringungskraft müßte eine ganz enorme sein⁴⁾.

Zeitliche Schwankungen, die an einigen Orten in der durchdringenden Strahlung beobachtet sind, hat man wohl auf Änderungen der radioaktiven Oberflächenschicht zurückgeführt, die unter dem Einfluß des Erdfeldes sich auf allen mit der Erde verbundenen frei exponierten Leitern nieder-

1) A. Gockel, Phys. Zeitschr. 11, p. 280, 1910; V. F. Heß, Phys. Zeitschr. 13, p. 1084, 1912.

2) W. Kohlhörster, Verh. der Deutsch. Phys. Ges. 15, p. 1111, 1913 und Abh. der Naturf. Ges. zu Halle a. S. Neue Folge. 4. 1914.

3) V. F. Heß, Phys. Zeitschr. 14, p. 617, 1913.

4) Nach einem kurzen Berichte von W. Kohlhörster über eine am 28. Juni 1914 bis 3900 m durchgeführte Hochfahrt ist das Vorhandensein einer γ -Strahlung in den höheren Luftschichten, die an Durchdringungskraft die des Radium C übertrifft, nicht mehr zu bezweifeln. (W. Kohlhörster, Verh. der Deutsch. Phys. Ges. 16, p. 719. 1914.)

schlägt¹⁾, auch an Verlagerungen der emanationshaltigen Bodenluft kann gedacht werden²⁾. Auch hier wäre die Realität der Erscheinung noch völlig sicherzustellen, da sie keineswegs von allen Beobachtern gefunden ist.

Die erstere Ursache reicht nach E. v. Schweidler³⁾ jedenfalls unter normalen Bedingungen für Potentialgefälle und Emanationsgehalt der Luft nicht aus, um die hier und da beobachteten Schwankungen erklärlich zu machen. Ob an Orten mit hohem Potentialgefälle (wie auf Bergspitzen und Türmen) die von dem aktiven Niederschlage ausgehende γ -Strahlung periodische vom Potentialgefälle abhängige Schwankungen der beobachteten Art bewirken kann, muß noch festgestellt werden.

Ausführliche Darstellungen des Gegenstandes finden sich bei K. Bergwitz⁴⁾, A. Gockel⁵⁾, F. V. Heß⁶⁾ und A. B. Chauveau⁷⁾.

29. Die Ionisierung der Atmosphäre als Folge der Radioaktivität.

Im Durchschnitt werden durch die allgemein verbreitete durchdringende Strahlung im Kubikzentimeter der Luft 2—3 Ionen in der Sekunde gebildet⁸⁾. Rechnet man dazu die 2—3 Ionen, die im Mittel durch den Gehalt der Luft an Radiumemanation und deren Abkömmlingen, also wesentlich durch α -Strahlung, erzeugt werden (der Einfluß der Thoriumprodukte kommt bei der so abgerundeten Zahl nicht zum Ausdruck), so gerät man auf eine Gesamtzahl von etwa 5 Ionen in der Sekunde, die dem wirklichen durchschnittlichen Ionisierungszustande der unteren Schichten der Atmosphäre (1000—2000 leicht bewegliche Ionen im Kubikzentimeter) einigermaßen entspricht. Die schweren, zuerst von Langevin beobachteten Ionen der Atmosphäre sind hierin nicht mit eingerechnet; sie entstehen aus den leicht beweglichen durch Anlagerung an Staub und Wasserteilchen und haben einen sehr kleinen Wiedervereinigungskoeffizienten, so daß ihre Zahl im Kubikzentimeter auf viele Tausende steigen

1) A. Wood und N. R. Campbell, Phil. Mag. 13, p. 265, 1907; E. Mache und Th. Rimmer, Phys. Zeitschr. 7, p. 617, 1906; Th. Wulf, Phys. Zeitschr. 10, p. 152, 1909.

2) K. Braun, Jahrb. der Elektronik 9, p. 204, 1912.

3) E. v. Schweidler, Wien. Ber. 122, p. 148, 1913.

4) K. Bergwitz, Habilitationsschrift. Braunschweig 1910.

5) A. Gockel, Phys. Zeitschr. 12, p. 595, 1911; Jahrb. der Elektronik 9, p. 1, 1912.

6) F. V. Heß, Wien. Ber. 120, p. 1575, 1911.

7) A. B. Chauveau, Le Radium 10, p. 17, 1913 und 10, p. 69, 1913.

8) S. A. Eve, Phil. Mag. 21, p. 34, 1911.

kann. Sind sie einmal aus einem gegebenen Luftraume entfernt, so regenerieren sie sich äußerst langsam ¹⁾).

Die eine Fundamentalfrage aus dem Bereiche der atmosphärischen Elektrizität, die nach der Herkunft des normalen Ionengehalts der unteren Luftschichten kann demnach durch den Nachweis der Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre als im wesentlichen erledigt gelten, allerdings wird die Leitfähigkeit der Atmosphäre über den Ozeanen, fern von den Emanationsquellen der Kontinente, noch einer eingehenden Untersuchung bedürfen ²⁾). Soviel man bis jetzt sagen kann, ist auch in diesem Falle der Zusammenhang mit den von den Festländern entweichenden Emanationsmengen höchst wahrscheinlich.

30. Geologische Folgerungen, Altersbestimmung an Gesteinen vermittelt des Heliumgehalts, Helium in Erdgasen. Es möge zum Schluß noch in größter Kürze auf die Förderungen hingewiesen werden, die der Geologie aus der Erforschung der Radioaktivität des Erdkörpers erwachsen sind. ³⁾

Die radioaktiven Mineralien, sofern sie als primäre Bestandteile in Gesteinen vorkommen, können noch in anderer Weise, als in Abschn. 2 gezeigt ist, als Hilfsmittel für die Bestimmung einer unteren Grenze des Alters jener Gesteine benutzt werden. Man weiß, wieviel α -Teilchen die Gewichtseinheit des Urans, das mit allen seinen Abkömmlingen einschließlich der Reihe des Radiums im Gleichgewicht ist, in der Sekunde abscheidet ($9,67 \cdot 10^4$) ⁴⁾. Da das α -Teilchen nach seiner Loslösung und nach dem Verlust seiner positiven Eigenladung nichts anderes als ein Atom von Helium darstellt, so kennt man die Zahl der in der Zeiteinheit in Freiheit gesetzten Heliumatome und findet durch Benutzung der Loschmidtschen Zahl für die Anzahl der im Kubikzentimeter enthaltenen Gasmoleküle das Volumen des entwickelten Heliums unter normalen Druck- und Temperaturverhältnissen zu etwa $11 \cdot 10^{-5}$ cmm für das Jahr. Bestimmt man demnach den Urangehalt eines radioaktiven Minerals zugleich mit der Menge des in der Masseneinheit enthaltenen Heliums, so findet man leicht die Zeit, die erfordert war, um diesen Betrag an Helium aus dem vorhandenen Uran und seinen Umwandlungs-

1) J. A. McClelland und H. Kennedy, Le Radium 10, p. 387, 1913.

2) Vgl. W. Knoche, Phys. Zeitschr. 13, p. 322, 1912; A. Nippoldt, Terrestrial Magnetism and Atmosph. Electricity 17, p. 33, 1912; G. Berndt, Phys. Zeitschr. 12, p. 865, 1911.

3) Ausführliches darüber findet man bei E. Rutherford im zweiten Bande dieses Handbuches, Abschn. XIX.

4) E. Rutherford und A. Geiger, Bulletin du Congrès International de Radiologie. Bruxelles 1910. p. 368. 1911.

produkten durch α -Strahlung hervorgehen zu lassen. Anstatt die von dem Mineral in der Zeiteinheit entwickelte Heliummenge aus dem Urangehalte durch Rechnung zu finden, kann man sie auch durch einen besonderen Versuch ermitteln. Dies Verfahren ist in dem Falle zweckmäßig, daß auch Thor in erheblicher Menge zugegen ist, andernfalls muß eine genaue Bestimmung des Thorgehalts vorangehen und auf dieses Element eine Jahresproduktion von $3,1 \cdot 10^{-5}$ cmm Helium pro Gramm gerechnet werden. Der Urangehalt ist entsprechend der Halbierungskonstante dieses Elements ($6 \cdot 10^9$ Jahre) als veränderlich in Rechnung zu ziehen. Setzt man voraus, daß alles gefundene Helium aus den α -Strahlen stammt, und daß das so entstandene Gas in dem Mineral dauernd eingeschlossen geblieben ist, so hat man zugleich eine Altersbestimmung für das letztere gewonnen. Die erstere Annahme darf wohl als begründet angesehen werden, die zweite trifft sicher in Strenge nicht zu. Der durch einen Verlust an Helium bewirkte Fehler äußert sich aber in dem Sinne, daß das Alter des betreffenden Minerals zu niedrig gefunden wird. Für Thorianite verschiedener Zusammensetzung ergaben sich nach Strutt¹⁾ als Minimalalter 250 bis 280 Millionen Jahre.

Für verschiedene geologische Formationen konnten aus heliumhaltigen Mineraleinschlüssen, die zugleich Radium in meßbarer Menge enthielten, ebenfalls solche untere Altersgrenzen gefolgert werden. So aus

Sphärosiderit	Rheinprovinz	Oligozän	8 400 000 Jahre
Hämatit,	Antrim	Eozän	31 000 000 Jahre
Hämatit,	Forest of Dean	Kohlenform.	150 000 000 Jahre
Sphen,	Ontario	Archaisch	710 000 000 Jahre

Man vergleiche hiermit die aus der Schwärzung der pleochroitischen Höfe im Glimmer berechneten Zahlen (Abschn. 2).

Eine dritte Methode der Altersbestimmung von Gesteinen gründet sich auf der Annahme, daß das Blei das Schlußglied der Umwandlungsreihe des Urans sei. Aus dem Gehalte eines Uranerzes an Blei kann man unter dieser Voraussetzung die Zeit berechnen, die zu dessen Ansammlung erforderlich war. Die Rechnung ist nur gültig unter den beiden weiteren Annahmen, daß das Mineral ursprünglich frei von Blei war, und daß eine Einwanderung dieses Metalls von außen her nicht stattgefunden hat. Die Annahme, daß das Endprodukt der Uranreihe chemisch vom Blei nicht abtrennbar ist, kann als gesichert angesehen werden, daraus darf aber nicht gefolgert werden, daß alles Blei, das in einem Uranerze gefunden wird, radioaktiven Ursprungs ist. Die Altersbestimmungen von Uranerzen aus dem Bleigehalte (die zu größeren Zahlen führen, als die mittels

1) J. R. Strutt, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 84, p. 386–388, 1910.

des Heliumgehalts gefundenen) verdienen daher nicht das gleiche Maß an Zutrauen, das man den auf den Heliumgehalt gegründeten entgegenbringen darf.

Die dem Erdboden teils selbständig, teils zugleich mit Wasser oder Erdöl entströmenden Gase zeigen einen bemerkenswerten Heliumgehalt, der den der atmosphärischen Luft beträchtlich übersteigt. Besonders reich an Helium (bis 0,7 Proz.) sind die Gase mancher Thermalquellen (z. B. Wildbad), aber auch das Grubengas und das chemisch ihm nahestehende, an manchen Orten in reichlicher Menge auftretende Erdgas sind (bis 0,014 Proz.) heliumführend¹⁾. Die durch diese Quellen der Atmosphäre zugeführten Heliummengen sind nicht gering; sie betragen z. B. für das Erdgasvorkommen von Neuengamme bei Hamburg 25 550 cbm, für das von Kissármás in Ungarn 4380 cbm im Jahre. Es ist unmöglich, diese starke Heliumproduktion auf noch bestehende radioaktive Umwandlungen, wie den Zerfall der in den Erdgasen enthaltenen Emanationen, zurückzuführen. Man muß annehmen, daß es sich hier um Gasvorräte handelt, die seit ungemein langen Zeiten in der erstarrten Erdkruste eingeschlossen waren, um sogenanntes „fossiles“ Helium, das seinen Ursprung längst abgelaufenen radioaktiven Prozessen verdankt^{2) 3)}.

31. Radioaktivität und Erdwärme. Die wesentlichste Förderung der Geologie durch den Nachweis der Radioaktivität der Erdmasse liegt in der Erkenntnis des Zusammenhanges dieser Eigenschaft mit der Erdwärme. Nachdem man weiß, daß das Radium einschließlich der Gleichgewichtsmenge seiner Abkömmlinge bis Radium C infolge der Absorption seiner Strahlen, insbesondere der energiereichen α -Strahlen, eine konstante Wärmequelle darstellt, die auf das Gramm von Radium und die Stunde berechnet 138, also in der Sekunde $3,83 \cdot 10^{-2}$ Grammkalorien liefert⁴⁾, muß man annehmen, daß eine dem Gesamtgehalt an Radium unseres Planeten entsprechende Wärmemenge ihm in der gleichen Zeit beständig im Innern zufließt.

Eine konstante Temperatur in irgendeinem Punkte des Erdinnern ist demnach nur dann zu erwarten, wenn der Wärmeverlust der Erde an ihre Umgebung jener Wärmezufuhr dauernd gleich ist. Nun läßt sich aus dem Temperaturgradienten an der Erdoberfläche in der Richtung der Normalen in Verbindung mit dem Wärmeleitvermögen des Materials der Oberflächenschichten die Stärke dieses nach außen abfließenden

1) H. Sieveking und L. Lautenschläger, Phys. Zeitschr. 13, p. 1050. 1912.

2) Emerich Czako, Zeitschr. für anorg. Chemie 82, p. 249, 1913.

3) Ch. Moureu et A. Lepape, Comptes Rendus 158, p. 598, 1914.

4) St. Meyer und V. Heß, Wien. Ber. 121, p. 603, 1912.

Wärmestromes mit einiger Genauigkeit abschätzen. Stellt man nun aber dieser Schätzung die Zahl von Kalorien gegenüber, die auf Grund der Joly - Strutt'schen Messungen des Radiumgehalts der Gesteine für die sekundlich in dem Erdkörper allein vom Radium entwickelte Wärmemenge berechnet wird, so steht man vor dem befremdlichen Ergebnisse, daß die Wärmeproduktion im Innern der Erde den Verlust nach außen ganz wesentlich überträfe. Vorausgesetzt ist dabei, daß der Radiumgehalt des Erdkörpers durch dessen ganze Masse hindurch gleichförmig verteilt sei¹⁾. Zur Begründung des Gesagten bezeichnen wir den Wärmeleitungskoeffizienten der Erdmasse, d. h. die Anzahl Grammkalorien, die durch einen Würfel von der Kantenlänge 1 cm hindurchfließen, in dem zwei gegenüberliegende Flächen auf einer Temperaturdifferenz von 1° C gehalten werden, mit λ ; das Temperaturgefälle an der Erdoberfläche in der Richtung des Radius betrage für das Zentimeter τ ° C, der Erdradius in Zentimeter gemessen sei R . Dann ergibt sich die Wärmeabgabe nach außen zu $4\pi R^2 \lambda \tau$ Kalorien in der Sekunde. Andererseits möge mit ϱ der durchschnittliche Gehalt an Radium eines Kubikzentimeters der Erdmasse bezeichnet werden, mit e die von einem Gramm Radium in der Sekunde entwickelte Wärmemenge. Dann ist die gesamte, von dem Radium der Erdmasse in einer Sekunde gebildete Wärme gleich $\frac{4\pi}{3} R^3 \varrho \cdot e$. Nehmen wir Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Abfluß der Wärme für unseren Planeten an, so müßte

$$\frac{4\pi}{3} R^3 \varrho \cdot e = 4\pi R^2 \lambda \tau$$

sein, woraus sich

$$\varrho = \frac{3\tau\lambda}{eR} \text{ ergibt.}$$

Die Einsetzung der Zahlendaten $\tau = 1/_{3500}$ ° C, $\lambda = 0,006$ Grammkalorien, $e = 3,83 \cdot 10^{-2}$ Grammkalorien, $R = 6,3703 \cdot 10^8$ cm führt auf $\varrho = 2,1 \cdot 10^{-13}$ Gramm Radium im Kubikzentimeter der Erdmasse. Diese Zahl ist in der Tat wesentlich kleiner als der Durchschnittswert ($3 \cdot 10^{-12}$), der von Strutt und Joly gefundenen Beträge. Da nur das Radium und seine Umwandlungsprodukte als Wärmequelle in Rechnung gezogen sind, neben ihnen aber das Uran (abgesehen von seiner Eigenschaft als Muttersubstanz des Radiums) und besonders das Thor mit ihren α -strahlen-

1) Vgl. darüber F. Himstedt, Phys. Zeitschr. 5, p. 210, 1904; C. Liebenow, ebenda 5, p. 625, 1904; E. Rutherford, Band II dieses Handbuchs; G. F. Becker, Bull. of the Geological Society of America 19, p. 113, 1908; J. Königberger, Phys. Zeitschr. 7, p. 297, 1906 und J. Joly, Comptes rendus du Congrès International de Radiologie, Bruxelles I, p. 370, 1910.

den Abkömmlingen einen wesentlichen Beitrag zu der Wärmeproduktion in der Erde liefern, so erscheint das hervorgehobene Mißverhältnis nur um so empfindlicher. Nach Rutherford's Berechnung wäre die der Erde — bei gleichförmiger Beschaffenheit durch ihre ganze Masse — infolge radioaktiver Prozesse zugeführte Wärmemenge das 200 fache der durch ihre Oberfläche in derselben Zeit abfließenden.

Man steht daher vor der Wahl, die Konzentration der radioaktiven Elemente in der Erdmasse an der Oberfläche wesentlich größer als im Innern anzunehmen oder die Möglichkeit einzuräumen, daß die mittlere Temperatur unseres Planeten, im Gegensatze zu der verbreiteten Lehrmeinung, im Steigen gegen einen Gleichgewichtszustand begriffen sei, bei welchem der Temperaturgradient an der Erdoberfläche gerade soviel Wärme nach außen fließen läßt, wie im Inneren entwickelt wird. Die erstere Annahme kann man noch in der Weise spezialisieren, daß der Gehalt an radioaktiver Materie von der Oberfläche an gerechnet zunächst konstant bleibe und erst bei Überschreitung einer bestimmten Tiefe auf Null sänke¹⁾, es läßt sich dann leicht die Dicke der radiumführenden schicht als von der Größenordnung von wenigen Kilometern schätzen²⁾.

1) R. J. Strutt, Proc. Royal Soc. A. 77, p. 472, 1906.

2) J. Joly findet eine Schicht von 21 km Dicke ausreichend, um den die Erdoberfläche erwartenden Wärmestrom zu decken.

